



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم هندسة الطرائق
Department of Process Engineering



Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

The Date :

التاريخ :

Ref :...../U.M/F.S.T/2023

رقم : / ج.م.ك.ع.ت//2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie des procédés des matériaux

Thème

Optimisation de fonctionnement de la section déshydratation de la
charge GPL du complexe GP1/Z

Présenté par

- 1- BENABDI Bilal
- 2- BENAHMED Hocine

Soutenu le 20/06/ 2023 devant le jury composé de :

Président :	BENDENIA SOUHILA	Professeur	Université de Mostaganem.
Examineur :	KHEDIM AMINE	MAA	Université de Mostaganem.
Rapporteur :	FEDDAL IMENE	MCA	Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2022/2023

Dédicace

*Avant tout c'est grâce à dieu que nous sommes
arrivées là.*

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

*A nos très chers parents et nos très chères grandes mères, qui
nous ont toujours été présents à nos côtés pour nous soutenir et
nous conseiller*

- *A nos tantes, A nos oncles, A tous nos sœurs, et frères.*
- *A tous les membres de la famille grande et petite*
- *A tous Ceux qui nous connaissent de près ou de loin sans cité
leurs noms, sans oublie nos enseignants et nos camarades de la
promotion de 2^{me} master génie des matériaux*

*Sans oublier notre encadreur du mémoire M^{me} **I. Feddal***

*Nous dédions ce travail à tous ceux qui nous ont aidés pour
l'obtention de ce diplôme sans aucune exception*

REMERCIEMENTS

Nous remercions notre Dieu qui nous a données la force et la patience pour terminer ce travail.

Nos vifs remerciements vont à nos parents qui ont participé à notre soutien tout au long de la période de préparation de ce mémoire.

Nous remercions profondément notre encadreur Dr I. FEDDAL, Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis, pour son aide et sa contribution tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous tenons également à remercier mes encadrants à GP1/Z Mr HAMADOUCH Djamel et Mr Fitas Mounir pour leur aide et leur suivi durant notre stage PFE.

Nos respects s'adressent également aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, nous remercions ainsi tous les enseignants de la faculté de FST, en particulier les enseignants du département de procédés.

Résumer :

Afin de préparer notre mémoire de mise en situation professionnelle, un thème nous a été attribué, qui est l'étude de l'impact de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge. Pour optimiser énergétiquement l'unité de déshydratation, nous avons effectué un calcul des différentes quantités de chaleur de toute la section de déshydratation, après une étude du bilan massique de la colonne d'adsorption, en commençant par présenter les données du problème ainsi que la méthodologie poursuivie pour mener à bien nos calculs.

Un travail de vérification a été, aussi, effectué pour s'assurer de la validité de la méthode de calcul.

A la fin de notre étude, une proposition d'un programme de calcul pour la détermination des paramètres optimaux de fonctionnement de déshydrateur de charge pour faire face au problème.

Mots clés : déshydrateur, colonne d'adsorption, eau, GPL.

Abstract :

In order to prepare our professional situation thesis, a theme was assigned to us, which is the study of the impact of the reduction in the water content of LPG on the operating parameters of the load dehydration section.

To energetically optimize the dehydration unit, we performed a calculation of the different amounts of heat of the entire dehydration section, after a study of the mass balance of the adsorption column, starting by presenting the data of the problem as well as the methodology used to carry out our calculations.

Verification work was also carried out to ensure the validity of the calculation method.

At the end of our study, a proposal of a calculation program for the determination of the optimum parameters of operation of load dehydrator to face the problem.

Keywords: dehydrator, adsorption column, water, GPL.

ملخص

من أجل إعداد أطروحة الوضع المهني لدينا ، تم تخصيص موضوع لنا ، وهو دراسة تأثير تقليل المحتوى المائي لغاز البترول المسال على معلمات التشغيل لقسم تجفيف الحمل.

لتحسين وحدة التجفيف بقوة ، أجرينا حسابًا لمقادير الحرارة المختلفة لقسم الجفاف بأكمله ، بعد دراسة توازن كتلة عمود الامتصاص ، بدءًا من تقديم بيانات المشكلة بالإضافة إلى المنهجية المستخدمة في إجراء حساباتنا.

كما تم إجراء أعمال التحقق للتأكد من صحة طريقة الحساب.

في نهاية دراستنا ، اقترح لبرنامج حساب لتحديد معلمات التشغيل المثلى لمجفف الحمل للتعامل مع المشكلة.

الكلمات المفتاحية: مجفف ، عمود امتصاص ، ماء ، غاز البترول المسال.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE DE GP1/Z

I.1 Présentation du Complexe	2
I.1.1 Situation	4
I.1.2 Principales Installations	4
I.1.3 Capacité	4
I.1.4 Alimentation De L'usine	4
I.1.5 Les Utilités	5
I.1.6. Les installations de production.....	5
I-1.7. Les installations de Stockage des Produits Finis	7
I-1.8. Les installations de chargements	8
I-1.9. Les installations d'Utilité	9
I.2. généralité sur les GPL	9
1.2.1 L'origine du GPL.....	9
I.2.2 Les caractéristiques des GPL	10
I.2.3 L'utilisation des GPL	12
I.2.4 Demande nationale des GPL.....	12
I.2.5 Risques des GPL	13

CHAPITRE II : SECTION DE DESHYDRATATION ET TAMIS MOLECULAIRE

II.1 Généralités	14
II.2 Les Modes de Déshydratation	14
II.2.1 La zone de transfert de masse (ZMT)	14
II.2.2 Concept de la zone de transfert de masse	16

II.3 Tamis Moléculaires	17
II.3.1 Généralités	17
II.3.2 Type et dimension du tamis	21
II.4 section déshydratation de charge	21
II.4.1 Généralités	21
II.4.2 Description interne du déshydrateur	22
II.4.3 le cycle de régénération	23
II.4.3.1 Drainage.....	23
II.4.3.2 Dépressurisation.....	24
II.4.3.3 Chauffage.....	24
II.4.3.4 Refroidissement	25
II.4.3.5 Remise sous pression.....	26
II.4.3.6 Remplissage en liquide	26

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III- OPTIMISATION DE LA SECTION DE DESHYDRATATION

III.1 Problématique.....	28
III.1.1 Interprétation des Graphes	29
III.1.2 La Méthode de calcul.....	29
III.2 Constitution d'un deshydrateur de charge	30
III.3 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel)	31
III.4 Température d'entrée du gaz de régénération.....	31
III.5 La théorie de calcul.....	31
III.5.1 Le Bilan Energétique.....	31
III.5.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération	31
III.5.1.2 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau Q_{des}	32
III.5.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis Q_{tamis}	32
III.5.1.4 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier Q_{acier}	32

III.5.1.5	Calcul des pertes de chaleur Q perte.....	32
III.5.1.6	Calcul de la chaleur H_f fournie par le four.....	33
III.5.1.7	Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr »	33
III.5.1.8	Calcul de la chaleur fournie par le four par H_f /cycle.....	33
III.5.1.9	Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref ».....	33
III.5.1.10	Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}	33
III.6.1	Le bilan de matière de la régénération	34
III.6.2	Calcul de la chute de pression	34
III.6.3	Calcul du nombre de Reynolds.....	34
III.7	Validation de méthode	35
III.7.1	Introduction	35
III.7.2	Dimensionnement d'un deshydrateur	36
III.7.2.1	Calcul de la quantité d'eau adsorbée	36
III.7.2.2	calcul du bilan thermique	40
III.7.2.3	Calcul du bilan de matière de la régénération	45
III.7.2.4	Récapitulation des résultats	49
III.8	Etude de la première solution	50
III.8.1	Calcul le débit d'eau	50
III.8.2	Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse.....	50
III.8.3	Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre	50
III.8.4	Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}	51
III.8.5	Calcul du temps d'adsorption.....	51
III.8.6	Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X).....	51
III.8.7	Détermination de l'efficacité d'adsorption	52
III.8.8	Calcul du bilan thermique	52
III.8.9	Calcul du bilan de matière de la régénération	54
III.8.10	Calcul des pertes de charges.....	54

III.8.11	Interprétation des résultats.....	56
III.9	Etude de la deuxième solution.....	57
III.9.1	Calcul le débit d'eau	57
III.9.2	Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse.....	57
III.9.3	Estimation de la quantité d'eau adsorbée M ads	57
III.9.4	Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre	57
III.9.5	Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X).....	58
III.9.6	Détermination de l'efficacité d'adsorption.....	58
III.9.7	Calcul du bilan thermique	58
III.9.8	Calcul du bilan de matière de la régénération	60
III.9.9	Interprétation des résultats	60
III.10	Interprétation et Choix de la Solution Optimale.....	61
III.11	Comparaison entre les deux Solutions Optimales	62
III.11.1	Première solution	62
III.11.2	Deuxième solution	64
 CHAPITRE IV : ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE		
IV.1	Introduction.....	66
IV.2	Etude économique des résultats de la solution optimale	66
IV.2.1	Gain en Gaz Naturel	66
IV.2.2	Gain sur la vie du Tamis Moléculaire.....	67
IV.2.3	Conclusion des résultats.....	68
	Conclusion générale	69
	Annexes	70
	Références bibliographiques	71

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : organigramme du complexe	02
Figure I.2 : Colonne de distillation du pétrole brut	10
Figure I.3 : Schéma principe de du procédé du (GPL)	11
Figure I.4 : La demande nationale en GPL	12
Figure II.1 : La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption	15
Figure II.2 : La courbe de percée	15
Figure II.3 : Tamis moléculaire sous ses différentes formes.....	17
Figure II.4 : Tamis moléculaire 3A et 4A.....	18
Figure II.5 : Schéma de déshydrateur	22
Figure II.6 : colonnes d'adsorption (déshydrateur) à tamis moléculaires	23
Figure II.7 : Profil de Température de régénération	25
Figure II.8 : schéma de la section déshydratation	27
Figure III.1 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant le mois de janvier 2023.	28
Figure III.2 : le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau... ..	63
Figure III.3 : le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau.....	63
Figure III.4 : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.....	65
Figure III.5 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Symboles des départements.....	03
Tableau II.1 : diamètres critiques de certaines molécules.....	20
Tableau II.2 : Le cycle de régénération comprend les cas suivants.....	23
Tableau III.1 : La fiche technique du tamis moléculaire	30
Tableau III.2 : Composition de la charge du GPL.....	35
Tableau III.3 : La composition du gaz de régénération (cas réel)	40
Tableau III.4 : Représentation des données de réchauffage du tamis.....	44
Tableau III.5 : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées.....	49
Tableau III.6 : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé	62
Tableau III.7 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé	64
Tableau IV.1 : les résultats.....	68

ABBREVIATIONS

BOG	Boil of gaz le nom de station de récupération et liquéfaction des gaz évaporées au Niveau de complexe GP1/Z.
BTU	British thermal unit l'unité de chaleur thermique dans le système d'unités anglais.
Lb	Livre l'unité de poids dans le système d'unités anglais.
Ft	Foot l'unité de longueur dans le système d'unités anglais.
Yin	La teneur en eau dans la charge GPL.
PSI	Psia unité de pression.
Nm3	Normal m3.
Cm3	Contra m3.

Introduction générale

Introduction générale

Le marché mondial des combustibles, incluant le gaz de pétrole liquéfié (GPL), est un défi à relever de nos jours. Il fut un temps où l'énergie était peu coûteuse et l'industrie ne prêtait pas une grande attention à ce sujet. Cependant, au fil des ans, les coûts énergétiques ont commencé à peser de plus en plus lourd sur les bilans d'exploitation des entreprises, et ces dernières se sont donc naturellement intéressées à ce poste de dépenses important dans le coût du produit final. Aujourd'hui, la consommation d'énergie est tout aussi importante pour les entreprises que la sécurité, la pollution ou le contrôle de qualité. Il est donc devenu primordial d'optimiser le fonctionnement des équipements pour un rendement maximum et une utilisation efficace de l'énergie.

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes intéressés à réaliser une étude sur l'optimisation de la section de déshydratation de la Charge dans le complexe GP1/Z.

L'objectif principal de notre travail est d'analyser les causes de la consommation excessive d'énergie observée dans cette section et de rechercher des solutions sans perturber le fonctionnement normal du complexe ni nécessiter d'investissements coûteux.

A cet effet notre mémoire est divisée en deux grandes parties : théorique et pratique. Outre l'introduction générale et la conclusion, le premier chapitre est consacré à la présentation du complexe gp1/z. Dans le deuxième chapitre nous avons présenté des généralités sur la section de déshydratation de la Charge.

Dans la partie pratique qui a fait l'objet de notre travail expérimental dans lequel nous avons réalisé des calculs à travers des bilans de matières et énergétiques basée sur des équations des débits massiques et molaires suite au résultat trouvé nous avons proposé des solutions et des recommandations relatives à l'augmentation du temps d'adsorption du sécheur . [1]

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

Description du complexe de GP1/Z

I-1. Présentation du Complexe

Le complexe de production de gaz de pétrole liquéfié (GPL) appelé GP1Z, ou "**JUMBO GPL**", est le dernier ajout aux ensembles industriels de la zone d'Arzew, appartenant à l'Entreprise Nationale **SONATRACH**.

Situé entre la centrale thermique de Mers El Hadjadj à l'est et les complexes de gaz naturel liquéfié à l'ouest, **JUMBO GPL** s'étend sur une superficie de **120 hectares** entre la Route Nationale **11** et la Mer Méditerranée.

Le complexe a été construit dans le cadre d'un contrat clé en main avec la contribution d'un **consortium japonais IHI-CITON**, et a été réceptionné le 2 septembre 1984.

Sa mission principale est de produire du butane, du propane et du mélange butane/propane à partir de GPL provenant du grand sud algérien, notamment des complexes de **Hassi Messaoud**, **Hassi R'Mel** et **Ain Amenas**.

L'usine a une capacité de production annuelle de **10,8 millions de tonnes par an**. Grâce à sa proximité géographique avec le marché et à ses capacités de production, le GP1Z occupe une place privilégiée sur le marché international du GPL pour **SONATRACH**. [1]

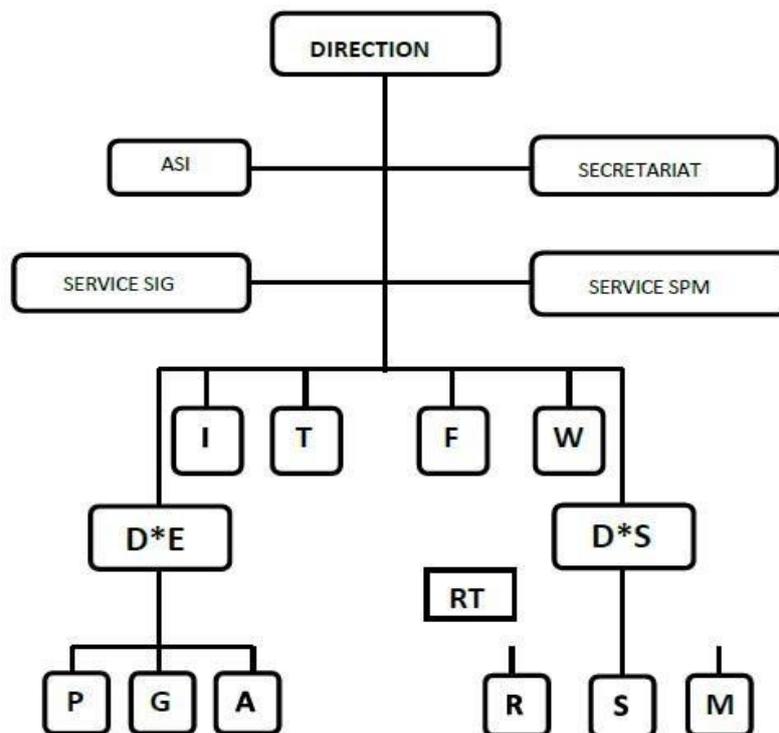


Figure I.1 : organigramme du complexe

Tableau I.1 : Symboles des départements

D	La Direction
T	Département Technique
SIG	Service Informatique et Organisation
I	Département Sécurité
F	Département Finance et Juridique
SPM	Section passation des marchés
W	Département Travaux neufs
D*E	Sous-Direction d'Exploitation
D*S	Sous-Direction du personnel
P	Département Production
RT	Relation de Travail
G	Département Maintenance
R	Département Ressources Humaines
S	Administration et social
A	Département Approvisionnement
ASI	Assistance sûreté interne
M	Département moyens généraux

I.1.1 Situation

D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1.Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERS EL HADJAJ) à l'EST et le complexe GNL3.Z à l'OUEST, entre la mer méditerranée et la route nationale N°11

I.1.2 Principales Installations

- * 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m3 chacune.
- * 09 Trains de traitement du GPL.
- * 03 Unités de reliquéfaction du gaz évaporé.
- * 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m3 chacun.
- * 04 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m3 chacun.
- * 04 Sphères de stockage de produits à température ambiante (propane et Butane) de 500 m3 chacune.
- * 01 Sphère de stockage gazoline.
- * 05 Salles de contrôle.
- * 02 Stations électriques alimentent par la SONELGAZ.
- * 06 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe en cas de coupure de courant.
- * 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variante entre 4000 et 5000 tonnes.
- * Une rampe de chargement de camions.
- * Une station de pompage d'eau de mer pour le réseau d'incendie.
- * Un système de télésurveillance.

I.1.3 Capacité

Le complexe produit 10 800 000 tonnes/an de GPL, comprenant du propane, du butane commercial et du pentane, à partir d'un traitement du GPL brut algérien en provenance des champs pétroliers et gaziers du sud.

I.1.4 Alimentation De L'usine

➤ Les sources d'alimentation

L'usine reçoit son alimentation de GPL des sources suivantes : Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Alrar, In amenas, Tin Fouye Tabankort (TFT) Rhourde Nouss, Gassi Touil.

I.1.5 Les Utilités

Elle alimente les diverses zones de production en :

- ❖ Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.
- ❖ Air : elle est divisée en deux :
 - ✓ Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
 - ✓ Air service : C'est de l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien.
- ❖ Vapeur : L'eau distillée vient de KAHRAMA et à partir de la chaudière on produit de la vapeur.
- ❖ Eau :
 - ✓ L'eau distillée.
 - ✓ L'eau de refroidissement.
 - ✓ L'eau potable
- ❖ Méthanol : Il est utilisé pour le dégivrage.
- ❖ Gasoil : Il est utilisé pour les générateurs de secours.
- ❖ Azote : Ballon d'azote, il y'a deux circuits
 - ✓ Circuit Gazeuse (HELIOS).
 - ✓ Circuit l'azote liquide (COGIZ) : On le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements.
- Un générateur électrique de secours d'une capacité de 25.617 Kw.
- Un système de sécurité vide-vite (blow-down).

Les torches : trois hautes pressions et deux basses pressions servent à brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains. [1]

I.1.6. Les installations de production

Ces installations comprennent neuf (09) trains de production dont trois nouvellement installés { phase III), et chaque train est composé des sections suivantes :

A- Section de déshydratation

Cette Section permet d'éliminer l'eau contenue dans le GPL d'alimentation en utilisant des Tamis moléculaires qui adsorbent les molécules d'eau afin d'éviter tout givrage dans la Section de réfrigération.

L'étude de la section de déshydratation sera détaillée dans le chapitre suivant, étant donné son étroite relation avec le sujet traité. [2]

B- Section de séparation de GPL

Cette section a pour but de séparer le GPL brut en produits commerciaux (propane (C₃) et butane (C₄) éventuellement C₅), avec un taux de récupération T_r maximum :

$$T_r = \frac{\text{C}_3 \text{ et C}_4 \text{ produit (commercialisé)}}{\text{C}_3 \text{ et C}_4 \text{ contenant dans la charge}}$$

La composition du GPL brut est le paramètre primaire qui détermine le fonctionnement global de la section séparation.

La charge passe tout d'abord par le fractionnateur qui sépare le produit de tête (le propane et l'éthane) et le produit de fond (le butane et le pentane).

B-1 Le Fractionnateur

La séparation du propane et de butane dans le fractionnateur est l'opération essentielle pour réaliser le taux de récupération voulu de chaque produit.

- La température d'entrée du fractionnateur est de 71°C .
- La pression à l'intérieur de la colonne est en moyenne de 20 Kg/cm².

B-2 Le déethaniseur

Cette colonne de fractionnement est mise en service lorsque le rapport C₂ / (C₂ +C₃) dans la charge est supérieur ou égal à 4.8 %(molaire) , elle traitera le produit de tête du fractionnateur.

L'alimentation se fait normalement sous forme de liquide sous-refroidi à 50°C.

La pression à l'intérieur de la colonne est de 22 Kg/cm².

B-3 Le dépentaniseur

Le dépentaniseur qui traitera le produit de fond sera mis en marche, lorsque le rapport C₅ / (C₅ + C₄) est supérieur ou égal à 1,75 % -

La température d'alimentation est de 60°C.

La pression d'alimentation est de 7 Kg/cm².

Notons qu'il n'existe qu'un seul dépentaniseur pour tous les trains.

C- Section de Réfrigération

Cette section est conçu pour réfrigérer le propane et le butane commercial produit dans la section séparation, les réfrigère jusqu'aux basses températures correspondant au point de saturation liquide et les dirige vers les bacs de stockage à basse température -

Les produits propane et butane sont réfrigérés à travers trois (03) échangeurs suivant un cycle fermé utilisant une boucle de réfrigération à propane. [2]

D- Section d'Huile Chaude

La section du fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour les rebouilleurs et le pré chauffeur final du fractionnateur.

Le four du fluide caloporteur fournit la chaleur nécessaire au gaz de régénération destiné à la section de déshydratation.

La température d'entrée de l'huile dans le four est de 130°C.

La température de sortie du l'huile du four est de 180°C.

I-1.7. Les installations de Stockage des Produits Finis

Elles comprennent Deux Sections :

A- Section de Stockage des Produits

Cette section assure le stockage des produits finis. Elle comprend : huit bacs de stockage à basse température dont :

- quatre pour le propane à $T = -42$ °C.
- quatre pour le butane à $T = -7$ °C.
- la capacité de chaque bac est de 70000 m³ .

Cinq sphères de stockage à température ambiante dont :

- une pour le propane à $P = 3.8-18 \text{ Kg/ cm}^2$.
- trois pour le butane à $P = 0.5 - 6.5 \text{ Kg / cm}^2$.
- Une sphère pour le propane a $P = 0.1 - 1.3 \text{ kg/cm}^2$ la capacité de chaque sphère et de 500 m^3

B- Section de Récupération des Gaz Evaporés (Boil of Gas)

Le but de cette récupération est la liquéfaction des gaz d'évaporation pour les renvoyer dans les systèmes de stockage.

Ces gaz d'évaporation proviennent des différentes capacités de l'usine (ex. les bacs de stockage et l'évaporation des gaz contenus dans les citernes, des navires au moment de leur chargement). [2]

I-1.8. Les installations de chargements

Les produits stockés sont expédiés vers les acheteurs par deux façons différentes.

Expédition par navires : cela concerne les produits à basse température (marché extérieur).

Expédition par camions : destinée au marché national et concerne les produits à température ambiante.

A- Section de Chargement de Bateaux à Basse Températures

Deux systèmes de chargements sont respectivement installés au bout des jetées

D1 et M6, le débit de chargement est le suivant :

Propane max.10.000m³/hr.

Poste **D1** 4.000 m³/hr.

Poste **M6** 10.000 m³/hr.

Butane max.10 000 m³

B- Section de Chargement de Camions à Température Ambiante

Dans cette Zone s'effectue le Chargement du Butane et du Propane à Température ambiante à partir de quatre (04) Sphères.

Les Sphères sont alimentées par les Sections de séparation (Voir le schéma de principe de procédé).

I-1.9. Les installations d'Utilité

Les utilités sont tout produit autre que les matières premières et les produits Finis qui participent activement à leur fabrication (énergie électrique, production de vapeur, d'air comprimé, d'eau distillé, azote, méthanol ...etc.). [2]

I.2. généralité sur les GPL

Le GPL, également connu sous le nom de gaz de pétrole liquéfié, est un mélange d'hydrocarbures qui sont gazeux dans des conditions normales de température et de pression, mais qui peuvent passer à l'état liquide par le biais d'un abaissement de la température ou de la pression, voire les deux. Les principaux composants de ce mélange sont le butane (C_4H_{10}) et le propane (C_3H_8).

Cette propriété physique offre un avantage en termes de stockage, car le GPL peut être stocké dans un volume réduit, un mètre cube de GPL liquide occupant **225 mètres cubes** à l'état gazeux.

Le GPL est un mélange d'hydrocarbures légers issus du raffinage du pétrole (représentant 40 % des ressources mondiales) et du traitement du gaz naturel (représentant 60 % des ressources mondiales).

Autrefois considéré comme un sous-produit de l'extraction du pétrole brûlé directement en haut de torches, le GPL est maintenant récupéré par distillation et les fractions les plus nobles sont utilisées comme carburant pour les véhicules en remplacement des essences plus coûteuses et plus polluantes. [1]

1.2.1 L'origine du GPL

Les gaz de pétrole liquéfiés sont obtenus principalement :

- Dans les raffineries de pétrole, en cours de la distillation du pétrole brut. (Voir figure I.2)

- Au cours des opérations de dégazolinage du gaz naturel sur les champs de production, pour obtenir les produits condensables butane et propane. [1]

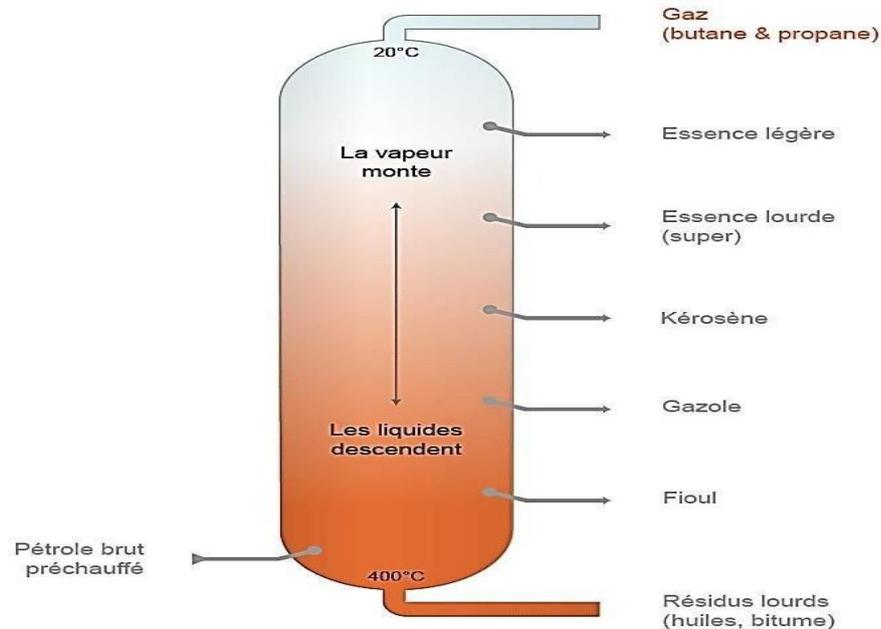


Figure I.2 : Colonne de distillation du pétrole brut

I.2.2 Les caractéristiques des GPL

Aux conditions normales de pression et de température, les GPL sont un gaz plus lourd que l'air.

Le butane commercial en phase vapeur est deux fois plus lourd que l'air, et le propane commercial est une fois et demi plus lourd.

Les GPL sont non corrosifs à l'acier et généralement au cuivre et à l'alliage du cuivre et d'aluminium.

Les GPL sont incolores, que ce soit en phase liquide ou vapeur.

Les GPL sont légèrement toxiques à l'état liquide ou vapeur.

Les GPL purs sont inodores, pour des raisons de sécurité, un odorant doit être ajouté. [2]

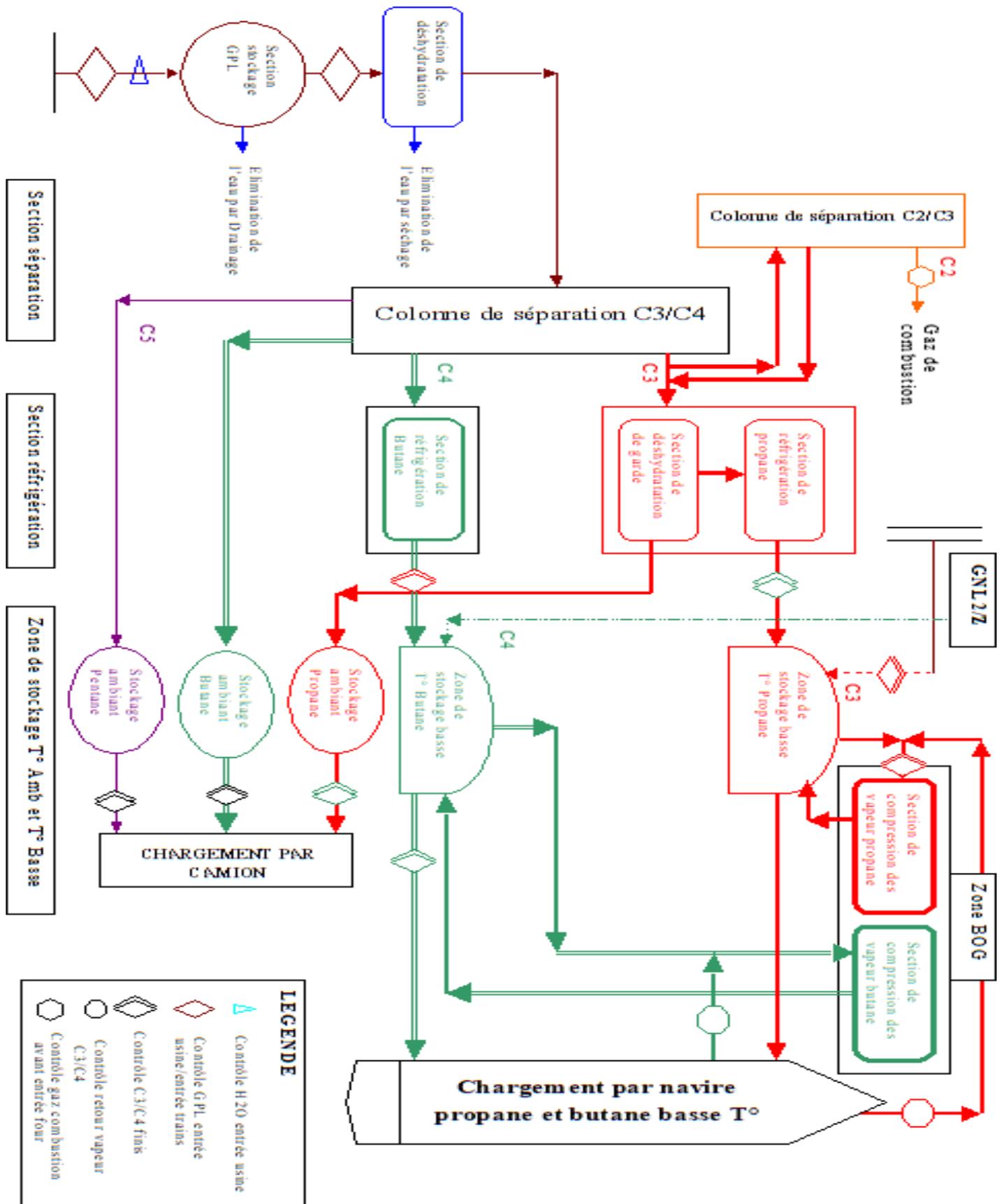


Figure I.3 : Schéma principe de du procédé du (GPL)

I.2.3 L'utilisation des GPL

Parmi les principales utilisations des GPL, on peut citer :

- ↪ La combustion (carburant auto).
- ↪ La climatisation : deux principes peuvent être réalisés :
- ↪ Les GPL absorbent la chaleur de l'environnement et créent du froid.
- ↪ Un moteur qui fonctionne aux GPL peut entraîner un compresseur qui comprime ce gaz, la détente absorbe de la chaleur et crée du froid.
- ↪ Matières premières pour l'industrie .exemple : Utilisation des GPL dans les centrales pour la création d'électricité. [2]

I.2.4 Demande nationale des GPL

La demande nationale de gaz de pétrole liquéfié (GPL) est d'environ 1,4 million de tonnes, avec une composition de 90 % de butane, 5 % de propane et 5 % de GPL carburant (GPL/c). [3]

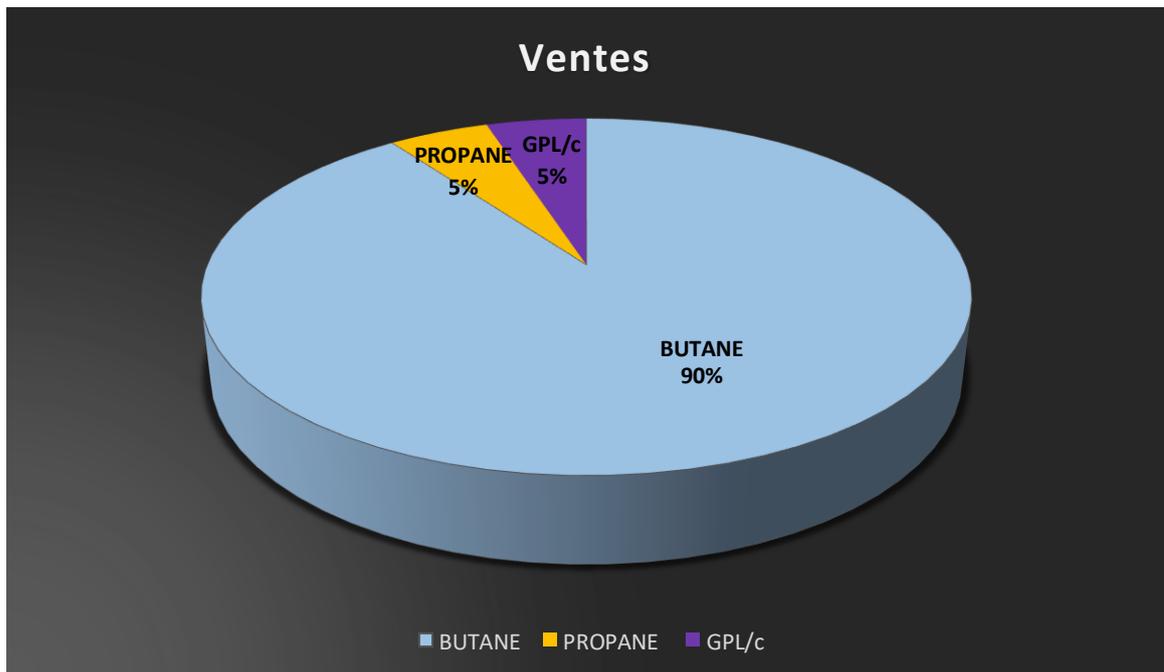


Figure I.4 : La demande nationale en GPL

I.2.5 Risques des GPL

❖ Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) sont souvent conservés sous forme liquide et sous pression. Si une fuite se produit, le liquide peut rapidement s'évaporer et produire une grande quantité de gaz inflammable.

❖ Le gaz peut s'enflammer lorsque sa concentration dans l'air atteint environ 2 % de son volume total. Par conséquent, une petite quantité de gaz mélangée à l'air peut être suffisante pour produire un mélange inflammable qui peut être allumé par une étincelle ou un élément chaud provenant d'un point de fuite, même à distance.

❖ Lorsque les GPL liquides s'évaporent rapidement, ils peuvent provoquer une baisse significative de la température ambiante, entraînant des brûlures sévères. Pour éviter cela, il est important de porter des vêtements de protection, tels que (des gants et des lunettes). [2]

CHAPITRE II

Section de déshydratation et tamis moléculaire

II.1 Généralités

La présence d'eau peut causer plusieurs problèmes lors de l'exploitation d'une installation, en fonction des conditions de température et de pression. La vapeur d'eau peut se condenser et former des hydrates, se solidifier ou favoriser la corrosion si le gaz contient des composants acides.

Pour éviter ces phénomènes, il est important de réduire la quantité d'eau dans le gaz naturel en utilisant des techniques de traitement appropriées, telles que la déshydratation du GPL par adsorption ou absorption. Dans ce paragraphe, nous nous concentrerons sur la déshydratation par adsorption.

Le processus de déshydratation en phase liquide utilise deux colonnes d'adsorption fonctionnant en parallèle, alternativement et de manière périodique. À chaque instant, une colonne est en train d'être régénérée tandis que l'autre est en ligne pour l'adsorption. La durée d'adsorption est normalement de 24 heures, mais peut être ajustée en fonction des caractéristiques du GPL à l'entrée.

À l'échéance de cette période, la colonne de réserve prend le relais et la colonne en service passe en régénération. Le gaz traverse la colonne du bas vers le haut pendant l'adsorption. La section de déshydratation de l'alimentation fonctionne de manière continue, automatique et en séquence sous la commande d'un programmeur - le contrôleur matriciel du cycle. [1]

II.2 Les Modes de Déshydratation

Les procédés de déshydratation du GPL peuvent être divisés en trois catégories :

- ↳ Inhibition par injection d'inhibiteur de formation d'hydrates.
- ↳ Déshydratation par absorption dans le liquide.
- ↳ Adsorption sur un agent desséchant solide activé. [1]

II.2.1 La zone de transfert de masse (ZMT)

L'adsorption est un phénomène de transfert de masse, et le transfert des molécules du fluide vecteur aux pores de l'adsorbant demande un temps fini. Ce temps est influencé par :

- ↳ La concentration (la quantité d'adsorbat devant être transférée).
- ↳ La présence de molécules concurrentes ou interférentes.

↳ L'ouverture des passages de diffusion (micropores) à l'intérieur des particules d'adsorbant, et la taille des pores actuels adsorbants.

La longueur du lit à travers laquelle un incrément de gaz passe pendant le transfert de n'importe quel composant de la phase gazeuse à la phase solide et appelée la zone de transfert de masse (ZMT). (Voir figure II.1). En réalité, la ZMT est une zone précédée d'une zone dite d'équilibre.

La zone de transfert de masse est égale à 1/3 de la zone de saturation, il est également courant d'ajouter 0.3 à 0.6 m de desséchant au fond du lit qui agissent comme sécurité pour éviter de faire sortir le point de percée du lit. (Voir figure II.2). [1]

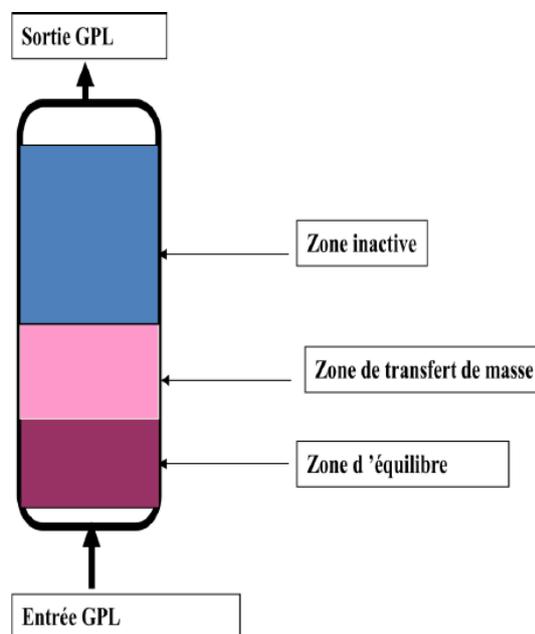


Figure II.1 : La zone ZMT se déplace lors de l'adsorption.

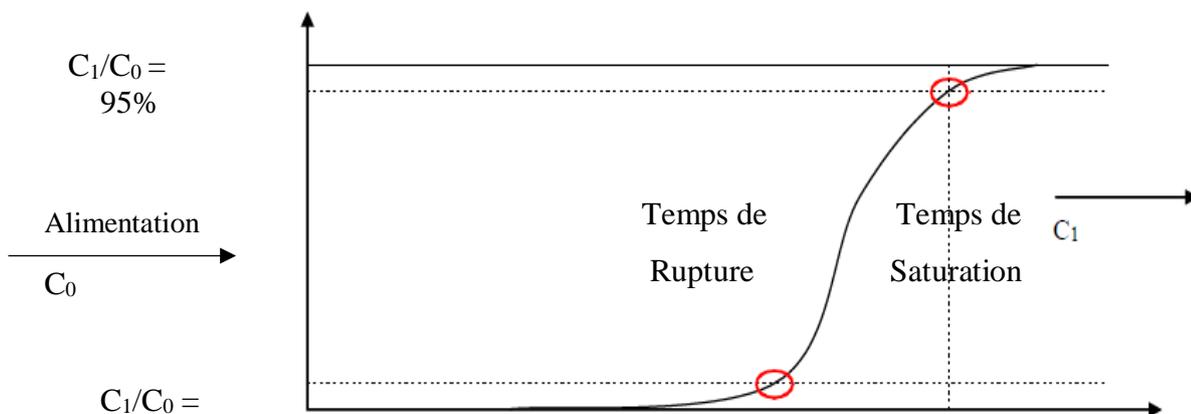


Figure II.2 : La courbe de percée.

Dans la pratique on limite le temps du cycle d'adsorption quand $t_{\text{cycle}} = t_{\text{rupture}}$

La Z.M.T est une fonction de :

- ↳ La nature de l'adsorbant.
- ↳ Du débit d'alimentation.
- ↳ La nature ou de la composition du mélange à traiter.
- ↳ De la saturation relative du mélange en adsorbat.

II.2.2 Concept de la zone de transfert de masse

La zone de transfert de masse correspond à la longueur du lit nécessaire au phénomène D'adsorption, ou la concentration de l'adsorbat à la sortie varie en fonction de la concentration initiale.

En amont de la zone de transfert, l'adsorbant est saturé.

En aval. L'adsorbant est vierge ou régénéré, est prêt à travailler.

L'importance de la zone de transfert de masse dépend principalement :

- ↳ De la cinétique d'adsorption de l'adsorbat.
- ↳ Des caractéristiques thermodynamiques du fluide.
- ↳ De la vitesse linéaire superficielle.
- ↳ Du type, de la forme et de la granulométrie du tamis moléculaire.

- **Les adsorbants**

Il existe cinq agents desséchants importants utilisés qui sont :

Le silica gel, l'alumina gel, l'alumine activée, le charbon actif et le tamis moléculaire.

Tous ces agents desséchants fonctionnent par un phénomène qui n'est pas très bien compris, en effet tous les solides sont maintenus ensemble par une force de cohésion qui n'est pas équilibrée à la surface et une très faible attraction pour les molécules présentes dans un courant fluide similaire à une attraction magnétique ; forçant ces molécules à adhérer à une surface.

Il existe également deux autres phénomènes reliés dans l'adsorption de surface.

Les forces d'adsorption ont tendance à être concentrées au niveau où la surface en S'incurvant pour former un cylindre ou un pore.

Au fur et à mesure que le diamètre de ce pore se rapproche du diamètre de la molécule à adsorber les forces de condensation commencent à se concentrer. [1]

II.3 Tamis Moléculaires

II.3.1 Généralités

Les tamis moléculaires se distinguent des agents adsorbants traditionnels principalement par leur capacité à adsorber des petites molécules tout en excluant les grandes molécules. Cela permet d'effectuer des séparations en se basant sur les différences de taille des molécules (voir l'annexe 1 et 2). Le tableau II.1 fournit des dimensions moléculaires qui servent de guide pour choisir le type de tamis moléculaires adapté à une utilisation spécifique.

Les tamis moléculaires sont des adsorbants uniques et fascinants disponibles sur le marché. Ils sont constitués d'aluminosilicates de métaux hydratés cristallins et présentent un certain nombre de propriétés inhabituelles.



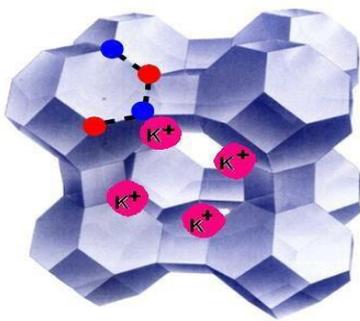
Figure II.3 : Tamis moléculaire sous ses différentes formes

Les tamis moléculaires sont des matériaux synthétiques importants sur le marché, mais leur structure est relativement similaire à certains minéraux naturels.

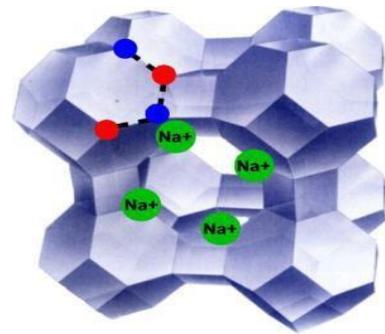
Les tamis moléculaires, également connus sous le nom de zéolithes, sont des silicoaluminates utilisés dans le traitement des gaz. Leur structure cristalline forme un réseau microporeux à l'échelle moléculaire, avec des cavités qui jouent le rôle de pores. Ces cavités, qui varient en taille en fonction des cations présents, permettent d'établir un réseau de canaux pour l'adsorption des molécules.

La présence de cations dans la structure contribue à la compensation de charge. Bien que les structures cristallines des tamis moléculaires puissent différer légèrement, les types les plus connus et les plus importants sont les types **A** et **X** (voir l'annexe 1). Ils sont largement utilisés comme agents adsorbants commerciaux.

Les tamis de structure A présentent des cavités d'accès de différentes tailles en fonction du cation de compensation. On trouve des tamis de 3\AA (tamis 3A), de 4\AA (tamis 4A) et de 5\AA (tamis 5A). En choisissant un tamis de type 3A ou 4A, il est possible d'adsorber l'eau à l'intérieur de la structure microporeuse tout en excluant les hydrocarbures. [1]



Tamis moléculaire 3A



Tamis moléculaire 4A

Figure II.4 : Tamis moléculaire 3A et 4A

Les tamis moléculaires permettent d'obtenir des puretés du gaz traité élevées (teneur en eau de l'ordre de 1 ppm).

Au moment de sa formation, ce réseau cristallin est rempli d'eau mais par un chauffage modéré, l'humidité peut être éliminée des cavités sans modifier la structure cristalline.

Ceci laisse d'innombrables cavités, avec un volume de pores et une surface combinée énorme et régulière, disponible pour l'adsorption d'eau ou d'autres fluides.

Dans les conditions favorables, le procédé d'évacuation et de remplissage des cavités peut être répété de manière indéfinie.

Les tamis moléculaires sont des aluminosilicates de métal cristallin avec une structure d'interconnexion tridimensionnelle formée de tétraèdres d'alumine ou de silice, les tétraèdres sont formés par quatre atomes d'oxygène entourant un atome de silice ou d'aluminium.

Chaque atome d'oxygène a deux charges négatives et chaque atome de silice a quatre charges positives. Cette structure permet, grâce à une distribution des charges, de construire un tétraèdre qui peut être répété de manière uniforme dans quatre directions, du fait de la trivalence

de l'aluminium, le tétraèdre d'alumine est chargé négativement, nécessitant un cation supplémentaire pour équilibrer le système.

Par conséquent, la structure finale possède des cations de sodium, de potassium ou de calcium dans le réseau. Ces cations « équilibrateurs de charges » constituent les ions échangeables de la structure d'une zéolite.

Dans la structure cristalline, jusqu'à la moitié des atomes de silice quadrivalents peuvent être remplacés par les atomes d'aluminium trivalents. En contrôlant les rapports des matériaux de départ, il est possible de produire des zéolites contenant différent rapport ion silice et ion aluminium et différentes structures cristallines contenant différents cations.

Les tamis moléculaires affichent un autre phénomène en plus de la condensation capillaire. Ces tamis sont des matériaux cristallins ayant des atomes chargés positivement et négativement, rigidement fixés en position.

Ceci résulte une distribution inégale des charges et crée une surface polaire cette dernière exerce une attraction électrostatique. Sur les molécules polaires telles que l'eau.

Par conséquent, les tamis moléculaires utilisent deux mécanismes d'adsorption, raison pour laquelle les tamis moléculaires sont des adsorbants bien plus puissants que le silicagel ou l'alumine.

Les tamis moléculaires, ayant des propriétés constantes : tels que les données d'équilibre qui se représentent sous forme d'une isotherme, représentent une relation d'équilibre existant entre le fluide et le solide.

La concentration de l'adsorbant, l'eau, est une fonction à la fois de la concentration de l'eau dans la phase fluide (pression partielle) et la température d'adsorption.

Les tamis moléculaires sont également caractérisés par leur capacité d'adsorption relativement élevée aux faibles concentrations du matériau absorbé.

Les caractéristiques principales d'un tel procédé sont les suivantes :

- La concentration en H₂O doit être faible ;
- Il est peu recommandé pour les grands débits de charge ;
- Le pourcentage résiduel d'eau est très faible ;
- Il nécessite un fonctionnement discontinu ;
- La présence de COS et CS₂ est nuisible ;
- L'adsorbant est un produit cher et doit être remplacé tous les 3 ans. [1]

Tableau II.1 : diamètres critiques de certaines molécules

Molécule	Diamètre critique (Å°)
Hydrogène	2.4
Acétylène	2.4
Oxygène	2.8
Monoxyde de carbone	2.8
Dioxyde de carbone	2.8
Azote	3
Eau	2.8
Ammoniac	3.6
Sulfure d'hydrogène	3.6
Méthane	4
Ethylène	4.2
Ethane	4.4
Méthanol	4.4
éthanol	4.4
Mercaptan méthylique	4.5
Propane	4.9
Propylène	5
Mercaptan éthylique	5.1
Butène	5.1
1,3-Butadiène	5.2
Chlorodifluorométhane (R-22)	5.3
thiophène	5.3
i-Butane à 1-C22 H46	5.6
Dichlorodifluorométhane	5.7
Cyclohexane	6.1
Benzène	6.7
Toluène	6.7
P-Xylène	6.7
M-Xylène	7.1
O-Xylène	7.4
Triéthylamine	8.4

II.3.2 Type et dimension du tamis

Le tamis moléculaire utilisé pour la déshydratation du GPL est de type 4°A. Ce dessiccant adsorbe les molécules ayant un diamètre effectif inférieur à 4°A y compris H₂S, CO₂, l'éthane et les hydrocarbures les plus légères, en excluant toutes les molécules ayant un diamètre effectif supérieur à 4°A.

Les usines de GPL préfèrent utiliser des granulés, car les granulés de petits diamètres offrent une surface plus importante par unité de volume pour le transfert de masse. [1]

II.4 section déshydratation de charge

II.4.1 Généralités

La déshydratation est effectuée sur la charge en provenance des différents champs afin d'éliminer l'eau dissout dans le GPL brut pour préserver nos équipements en Aval et éviter ainsi toute perturbation qui peut être causée par la présence de givrage et/ou formation d'hydrates au niveau des circuits et des Instruments. Chaque train possède une section de déshydratation de la charge pour réduire la teneur en eau dissout dans le GPL d'une quantité maximale de 100 ppm à une valeur de moins de 5 ppm.

La section déshydratation de charge comprend trois colonnes d'adsorption, constituées de tamis moléculaire et fonctionnant en parallèle.

A tous instant, une colonne est en ligne pour l'adsorption, une deuxième en régénération, tandis que la troisième est en réserve.

La durée d'adsorption est de 36 heures, à l'expiration de ce temps, la colonne en réserve est mise en ligne, et la colonne qui était en service passe en régénération.

A ce moment-là, la troisième colonne a achevé son cycle de régénération et passe en réserve. Pendant l'adsorption, l'écoulement à travers la colonne se fait du bas vers le haut. Il faut aussi noter que la section déshydratation de la charge peut travailler sur seulement deux adsorbeurs, si bien qu'une colonne peut être révisée, pendant que les deux autres assurent l'adsorption de la charge. [1]

II.4.2 Description interne du déshydrateur

- Une conduite d'entrée (en bas du déshydrateur) pourvue d'un Répartiteur de charge GPL.
- Une grille avec matelas à maille de 4 mesh et un autre de 20 mesh supportant deux couches de billes céramiques de diamètre de (1/2" et 1/4").
- Une charge d'Alumine Active.
- Un matelas (en haut à mailles de 20 mesh) supportant une autre couche de billes céramiques de diamètre (1/2").
- Un matelas à mailles de 20 mesh couvrant les billes céramiques d'en Haut.
- Un Filtre Empêchant l'entraînement d'Alumine.
- Une conduite de Sortie (pour l'alimentation du Fractionnateur).

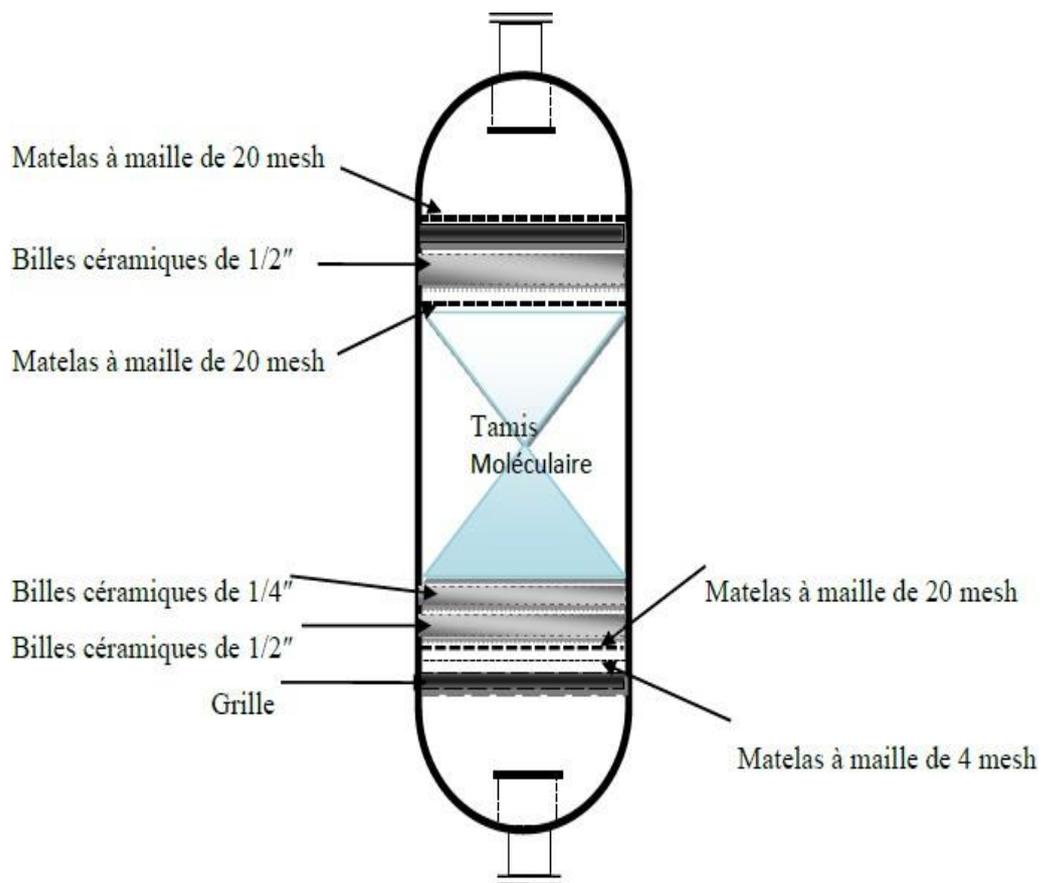


Figure II.5 : Schéma de déshydrateur



Figure II.6 : colonnes d'adsorption (déshydrateur) à tamis moléculaires

II.4.3 le cycle de régénération

Tableau II.2 : Le cycle de régénération comprend les cas suivants

Etapes	Temps (H)	P (bar) (Kg/cm ²)	T (°C)
Drainage	1	20	30
Dépressurisation	0,5	4,5	30
Réchauffage	11	4,5	280
Refroidissement	5	4,5	12,7
Pressurisation	0,5	20	45
remplissage	1	30	30

II.4.3.1 Drainage

Dès que V-1001B est mis en ligne, la vanne 2A se ferme. Après la fermeture de cette vanne, la séquence de régénération commence avec le drainage du GPL restant dans la colonne d'adsorption. Le GPL brut est évacué vers les réservoirs sphériques d'alimentation sous la pression du gaz naturel (20 kg/cm²) eff introduit en haut de la colonne.

Les vannes 3A et 4A s'ouvrent pour refouler le GPL vers les réservoirs sphériques d'alimentation, à l'état liquide. A ce moment, LS-1, un contact de niveau est mis en service.

Lorsque le niveau liquide atteint LS-1, la vanne 3A et ensuite la vanne 4A se ferment. L'opération de drainage est alors terminée et LS-1 est mis hors service.

Le temps prévu pour le drainage est d'environ une heure. [1]

II.4.3.2 Dépressurisation

Après drainage complet de la colonne d'adsorption, la pression dans V-1001 A est de 20 kg/cm² eff. Avant de pouvoir commencer la séquence de chauffage, il faut que cette pression soit réduite à 4,5 kg/cm² eff.

Lorsque les vannes 3A et 4A sont en position fermée, la commande automatique chronologique ouvre d'abord la vanne 11 et ensuite la vanne 7A, et met le contact de la pression différentielle, PDS-2 en service. V-1001A est alors dépressurisé lentement vers le réseau de fuel gaz.

Lorsque PDS-2 signale un débit zéro, la vanne 11 se ferme automatiquement la vanne 7A reste ouverte. La pression dans la colonne est alors de 4,5 kg/cm³ eff. La dépressurisation demande environ une demi-heure. [1]

II.4.3.3 Chauffage

La séquence de chauffage représente l'opération principale de la séquence de régénération, puisque l'eau adsorbée est complètement chassée des tamis moléculaires pendant cette opération.

Le lit du tamis moléculaire est chauffé du haut vers le bas, en se servant du gaz naturel chaud, qui a été porté à 280°C dans le four de fluide caloporteur.

Pour lancer la séquence de chauffage, on ouvre les vannes 8,6 et 10A. Le contrôleur du débit dans la canalisation du gaz chaud introduit un débit constant de gaz dans le lit, qui s'échauffe lentement, pour chasser l'eau entraînée.

L'aéroréfrigérant E-1001 est mis en service pour refroidir le gaz sortant du lit et pour condenser une partie de l'eau contenue dans le gaz. Le gaz refroidi entre dans le séparateur de drainage V-1002 où l'eau libre est séparée et s'écoule sous contrôle du niveau, vers les égouts des eaux huileuses.

Le gaz refroidi passe en tête vers le réseau de fuel gaz. Le condensat d'hydrocarbure qui

se forme éventuellement au-dessus du niveau de l'eau libre est envoyé sous contrôle de niveau vers le réseau de purge. Le gaz refroidi peut aussi être envoyé directement à la torche, sous contrôle de pression.

La période de chauffage demande 11 heures, ensuite le cycle est arrêté par le programmeur et par TS-1 qui signale que le fond du lit a atteint sa température de régénération de 280°C. [1]

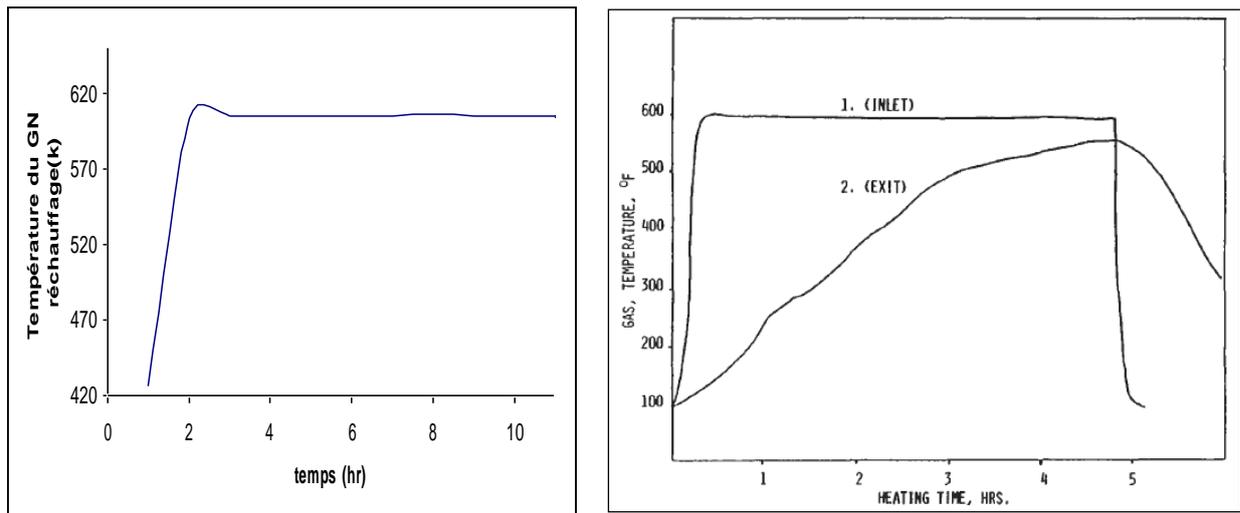


Figure II.7 : Profil de Température de régénération.

II.4.3.4 Refroidissement

Le refroidissement du lit se fait du fond vers le haut, c'est-à-dire en sens opposé du chauffage. Pour la séquence de refroidissement, on fait appel au gaz naturel froid (12.7 °C).

Pour lancer le refroidissement, les vannes 5 et 9 s'ouvrent et TS-2 est mis en service. Les vannes 7A et 10A restent ouvertes après la séquence de chauffage et E-1001 reste en service.

Le flux du gaz froid entrant dans le lit est maintenu par un contrôleur de débit. Le refroidissement demande 5 heures et sa fin est signalée par TS-2 qui indique que le dessus du lit s'est suffisamment refroidi (45 °C). Le gaz utilisé pendant la séquence de refroidissement continue à s'écouler vers le réseau de fuel gaz.

Après le refroidissement, les vannes du lit 9, 7A et 5 se ferment et TS2 est mis hors service.

II.4.3.5 Remise sous pression

Avant de pouvoir réintroduire du GPL liquide dans la colonne, V- 1001A doit être remis sous pression par du gaz naturel (20 kg/cm² eff.) pour éviter une détente du GPL brut et ainsi une perte du produit.

Pour la remise sous pression, un faible débit de gaz naturel sous haute pression est introduit dans la colonne. Les vannes 13 et 4A s'ouvrent automatiquement et PDS-3 est mis en service.

La pression augmente dans la colonne jusqu'au point de tarage de PDS-3. La vanne 4A se ferme alors et PDS-3 est mis hors service. La pression dans V-1001A atteint alors 20 kg/cm² eff.

L'opération de remise sous pression dure environ une demi-heure. [1]

II.4.3.6 Remplissage en liquide

Après la remise sous pression, le GPL liquide peut être réintroduit dans la colonne, sans risque de détente.

Au fur et à mesure que le GPL liquide remonte dans la colonne, le gaz est refoulé sous contrôle de pression en tête. Lorsque le niveau du liquide atteint LS-2, la vanne 12A se ferme. Cette opération demande environ une heure.

V-1001A a alors achevé le cycle de régénération et se trouve en réserve. La durée de disponibilité en réserve est normalement de 53 heures. La durée totale de la régénération est de 15 heures.

17 heures plus tard, le cycle d'adsorption de V-1001B est achevé et son cycle de régénération commence. V-1001C est mis en ligne et commence son cycle d'adsorption tandis que V-1001A reste en réserve. [1]

CHAPITRE III

Optimisation de la section de déshydratation

III.1 Problématique

Dans notre étude nous allons traiter l'impact de la diminution de la teneur en eau du GPL sur les paramètres de fonctionnement de la section de déshydratation de charge.

Le design de la déshydratation de charge du complexe GP1/Z a été conçu pour une teneur en eau dissoute dans la charge GPL égale à 100 ppm, mais actuellement on a remarqué que cette teneur n'est pas atteinte ; ceci est dû au prétraitement de la charge provenant du sud.

En effet pour une concentration en eau égale à 100ppm le temps d'adsorption a été fixé à 36 heures et celui de la régénération à 19 heures. Mais les concentrations actuelles d'eau dans les charges GPL sont réduites à des valeurs qui peuvent même chuter jusqu'au moins de 25 ppm de ce fait le tamis n'est pas totalement utilisé.

Le suivi de la teneur en eau dans le GPL à l'entrée du deshydrateur a été effectué sur une durée d'un mois suivant la courbe ci-dessous. Le problème persiste et est permanent et ceci conduit à de considérables pertes économiques vu que le lit d'adsorption travaille au-dessous de sa capacité d'adsorption.

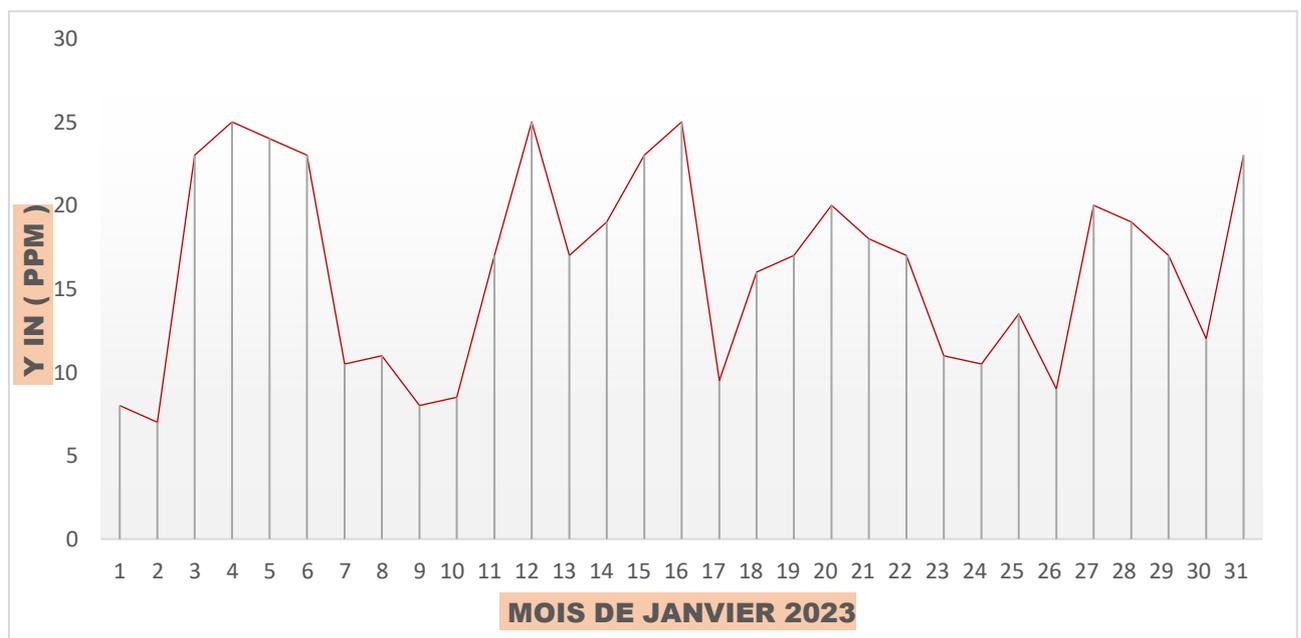


Figure III.1 : la variation de la teneur en eau dans la charge durant le mois de Mars 2023

Dans le but d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de charge, l'objet de notre travail consiste à effectuer une étude en prenant en considération les différentes concentrations en eau.

C'est pourquoi on a commencé par la recherche des solutions possibles à notre problème cette recherche nous permet d'étudier les trois solutions qui sont les suivantes :

- la prolongation du temps d'adsorption.
- la réduction du temps de régénération
- la réduction de la masse du tamis moléculaire.

En se basant sur le dimensionnement du déshydrateur de charge et calcul du bilan massique et énergétique.

On choisira la solution qui nous permet le plus d'économiser de l'énergie et de préserver la durée de vie du dessicant sans pour autant perturber la capacité de production et la qualité du produit final.

Il a été remarqué qu'il va y avoir moins de dépôt de coke sur la surface du tamis ; Grâce à la réduction du nombre de cycles de chauffage. Par conséquent la durée de vie du desséchant augment suite à cette diminution par ce qu'il va être moins exposé aux contraintes des séquences : dépressuration, pressurisation, chauffage, refroidissement.

III.1.1 Interprétation des Graphes

D'après les relevés qu'on a effectués durant la période de notre stage on a fait un bulletin d'analyse de la teneur en eau de la charge GPL à l'entrée du sécheur, on a fait le suivi pendant un mois « figure (III.1) » donc la concentration de la charge en eau ne dépasse pas les 25 ppm qui sont une teneur inférieure à la valeur design (100 ppm).

Donc le sécheur travaille bien au-dessous de sa capacité d'adsorption ; et ceci induit à des pertes considérables en énergie.

III.1.2 La Méthode de calcul

Le but de cette partie de travail est d'optimiser le fonctionnement de la section de déshydratation de la charge, en déterminant le temps d'adsorption nécessaire pour faire fonctionner l'adsorbent jusqu'à son point de saturation, en fonction de la teneur d'eau dans la charge ; tout en essayant d'optimiser les paramètres de fonctionnement du cycle de chauffage.

Pour cela, partie calcul comprend :

- Un bilan thermique.
- Un bilan de matière.

Les bilans thermiques et matière sont les parties essentielles de notre travail, où on va évaluer la quantité de chaleur et le débit de GN nécessaires à la régénération du sécheur.

Avant toute application, nous nous assurons de la fiabilité de la méthode adoptée par la suite dans un chapitre intitulé « Validité de la méthode » où les calculs seront faits pour un déshydrateur e charge fonctionnant selon le design. [2]

III.2 Constitution d'un deshydrateur de charge

La partie essentielle d'une colonne de déshydratation est le tamis moléculaire qui est l'agent adsorbant. Et une couche de billes en céramique (alumine) de 150 mm d'épaisseur avec une couche similaire au-dessus qui présentent un support.

En général des treillis métalliques, des grilles et des tiges sont utilisés pour supporter le tamis moléculaire. [2]

Tableau III.1 : La fiche technique du tamis moléculaire [4]

Diamètre nominal des pores	4°A
Diamètre des particules	3.2 mm
Densité tassée	640 kg/m ³
Chaleur de désorption de l'eau	1800 BTU / Lb d'eau
Teneur en eau résiduelle	2%
Capacité en eau à l'équilibre	22%
Capacité calorifique	0.22 k cal / kg °C

III.3 Les conditions opératoires d'adsorption / désorption (cas réel)

↳ Durée d'adsorption : 36 heures.

↳ Durée de régénération : 19 heures.

Réchauffage = 11 heures.

Refroidissement = 5 heures. [6]

III.4 Température d'entrée du gaz de régénération

Réchauffage T = 280°C.

Refroidissement T = 12.7°C. [6]

III.5 La théorie de calcul [2]

III.5.1 Le Bilan Energétique

III.5.1.1 Calcul de la quantité totale de chaleur nécessaire à la régénération

La quantité de chaleur nécessaire à la régénération est :

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{pertes}} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{pertes}}$$

Q_{tamis} : La chaleur nécessaire au réchauffage du tamis de la température D'adsorption à La température de désorption (BTU).

Q_{acier} : La chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier de la température d'adsorption La température de désorption (BTU).

Q_{des} : La chaleur nécessaire à la désorption de l'eau fixée sur le tamis (BTU).

Q_{pertes} : Considérées comme étant égales à 10% de la somme ($Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}}$) (BTU).

III.5.1.2 Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption de l'eau Q_{des}

On calcul la chaleur de désorption de l'eau par la formule suivante :

$$Q_{des} = M_{ads} * \Delta H \dots\dots\dots (2)$$

ΔH : La chaleur spécifique de désorption de l'eau (BTU/ Lb).

III.5.1.3 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage du tamis Q_{tamis}

$$Q_{tamis} = m_t * C_{pt} * (T - T_{ads}) \dots\dots\dots (3)$$

m_t : La masse totale du tamis moléculaire (Lb).

C_{pt} : La capacité calorifique du tamis (BTU/ Lb. °F).

T : La température moyenne du lit en fin de réchauffage (°F).

T_{ads} : La température d'adsorption (°F).

III.5.1.4 Calcul de la chaleur nécessaire au réchauffage de l'acier Q_{acier}

$$Q_{acier} = m_c * C_{pc} * (T - T_{ads}) \dots\dots\dots (4)$$

m_c : La masse totale de l'acier (Lb)

C_{pc} : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F).

III.5.1.5 Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

$$Q_{perte} = 0.1 * (Q_{des} + Q_{tamis} + Q_{acier}) \dots\dots\dots (5)$$

Pour pouvoir calculer les besoins en chaleur (Q_{totale}), nous avons besoin de la température du lit en fin de chauffage « T » :

❖ Calcul de la température du lit « T » [2]

On peut l'obtenir par la relation suivante :

$$T = T_s - (T_e - T_s) / 2 \dots\dots\dots (6)$$

T_e : La température d'entrée du gaz de régénération (°F).

T_s : La température de sortie du gaz de régénération (°F).

III.5.1.6 Calcul de la chaleur H_f fournie par le four [2]

$$H_f = Q_{\text{totale}} / (1/\epsilon) \dots \dots \dots (7)$$

(1/ε) : L'efficacité thermique de four.

III.5.1.7 Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » [2]

$$t_r = H_f / (\Delta H_{(T_i - T_e)} * M_g) \dots \dots \dots (8)$$

M_g: Le débit du gaz de chauffage (Nm³ / hr).

ΔH_(T_e - T_{ads}) : La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³).

t_r : Le temps de chauffage (hr).

III.5.1.8 Calcul de la chaleur fournie par le four par H_f /cycle

$$H_{f/cycle} = (3 * H_f * t_r) / C_{cycle}$$

$$C_{cycle} = 3 * t_{ads}$$

$$H_{f/cycle} = (H_f * t_r) / t_{ads} \dots \dots (9)$$

H_{f/cycle}: la chaleur fournie par le four par cycle (BTU/hr).

t_{ads} : le temps d'adsorption (hr).

III.5.1.9 Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref »

$$t_{ref} = ((Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}) / Q_{\text{totale}}) * t_r \dots \dots \dots (10)$$

III.5.1.10 Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

$$Q_{ref} = (Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}) / t_{ref} \dots \dots \dots (11)$$

III.6.1 Le bilan de matière de la régénération [2]

❖ Calcul du débit du gaz de refroidissement

Le débit du gaz de refroidissement est calculé comme suit :

$$M_{\text{ref}} = Q_{\text{ref}} / \Delta H_{(T_s - T_e)} \dots \dots \dots (12)$$

$\Delta H_{(T_s - T_e)}$: La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³) de refroidissement

M_{ref} : Le débit du gaz de refroidissement (Lb/ hr).

Q_{ref} : la chaleur soutirée au système. (BTU/ hr).

T_E : la température d'entrée du gaz de refroidissement (°F).

Après les bilans thermiques et matières, il faudra s'assurer que le débit calculé n'engendrera pas une perte de charge trop importante et que l'écoulement est bien turbulent.

III.6.2 Calcul de la chute de pression [2]

La perte de charge par unité de longueur est donnée par l'équation modifiée :

$$\Delta P/L = A * VIS * U + B * \rho_{GN} * U^2 \dots \dots \dots (13)$$

Ou :

$\Delta P/L$: la perte de charge par unité de longueur (psi / ft).

VIS : la viscosité du GN (Cp) .

U : la vitesse superficielle (ft / min).

ρ_{GN} : la masse volumique du GN (Lb/ ft³).

A et B : des constantes relatives aux dimensions des particules du tamis.

$$A = 0.0561, B = 0.0000889.$$

III.6.3 Calcul du nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est calculé par la formule suivante :

$$Re = (G * D_p) / VIS \dots \dots \dots (14)$$

III.7 Validation de méthode

III.7.1 Introduction

Avant d'entamer nos calculs, nous nous assurons de la validité de la méthode adoptée.

Pour cela, nous reprendrons le calcul d'un sécheur de la section déshydratation de la charge pour un taux de traitement égal à 100 %.

Nous reprendrons essentiellement le calcul de la quantité de chaleur nécessaire à la régénération ainsi que le débit approprié.

⇒ Propriété du GPL

- ✓ Débit de traitement à 100% : $Q = 240 \text{ m}^3/\text{hr} = 8675.09 \text{ ft}^3/\text{hr}$
- ✓ $P = 30.7 \text{ Kg} / \text{cm}^2$
- ✓ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$

Tableau III.2 : Composition de la charge du GPL [6]

COMPOSANT	M_i g/mole	Y_i molaire %	$Y_i * M_i$
C1	16,043	0.24	0.04
C2	30,07	1.92	0.58
C3	44,097	59.37	26.18
i-C ₄	58,123	13.68	7.95
n-C ₄	58,123	24.54	14.26
i-C ₅	72,15	0.20	0.14
n-C ₅	72,15	0.05	0.04

Poids moléculaire du GPL : $M_{GPL} = \sum Y_i * M_i$

$$M_{GPL} = 49.19 \text{ Kg /Kmole}$$

- ✓ Solubilité de l'eau dans le GPL à $T=25^\circ\text{C}$ (voir Annexe 3)
- ✓ Teneur en eau à l'entrée du sécheur : $X_E = 100 \text{ ppm}$.
- ✓ Teneur en eau à la sortie du sécheur : $X_s = 1 \text{ ppm}$.
- ✓ Phase : liquide
- ✓ Masse volumique du GPL : $\rho_{GPL} = 530 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 33.09 \text{ Lb} / \text{ft}^3$.

III.7.2 Dimensionnement d'un deshydrateur [2]

III.7.2.1 Calcul de la quantité d'eau adsorbée

❖ Diamètre minimum du lit :

Pour le calcul du diamètre minimum du lit, on utilise la formule suivante :

$$D_{\min} = [(4 * (\rho_{\text{GPL}} * Q) / (\pi * G))]^{0.5} \dots\dots\dots(15)$$

D_{\min} : Diamètre minimum du lit de tamis (ft).

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ ft³).

Q : Débit volumique de la charge (ft³ / hr).

G : Vitesse massique de l'écoulement de fluide (Lb /ft² .hr).

Pour les tamis moléculaires, la vitesse massique de l'écoulement est donnée par la formule suivante :

$$G = 3600 * (C * \rho_{\text{tamis}} * \rho_{\text{GPL}} * D_p)^{0.5} \dots\dots\dots (16)$$

D_p : Diamètre moyen des particules du tamis (ft).

ρ_{tamis} : Masse volumique du dessicant (Lb/ ft³)

C : Constante relative aux tamis moléculaire (C = 1.06)

❖ Application Numérique

$D_p = 0.01 \text{ ft.}$

$\rho_{\text{tamis}} = 640 \text{ kg / m}^3 = 40.02 \text{ Lb / ft}^3.$

$\rho_{\text{GPL}} = 530 \text{ kg / m}^3 = 33.09 \text{ Lb / ft}^3.$

$g = 32.2 \text{ ft / sec}^2.$

$C = 1.06.$

\Rightarrow **G = 13476.03 Lb/ft² .hr**

$G = 1.38 \cdot 10^6 \text{ (lb / ft}^2 \cdot \text{hr)}.$

$Q = 240 \text{ m}^3 / \text{hr} = 8675.09 \text{ ft}^3 / \text{hr}$

$\left. \begin{array}{l} G = 1.38 \cdot 10^6 \text{ (lb / ft}^2 \cdot \text{hr)} \\ Q = 240 \text{ m}^3 / \text{hr} = 8675.09 \text{ ft}^3 / \text{hr} \end{array} \right\} \Rightarrow$ **D_{min} = 5.2 ft = 1.58 m**

❖ **La hauteur total du lit [2]**

La hauteur totale du lit est donnée par l'équation suivante :

Avec :
$$H_t = H_s + H_z \dots \dots \dots (17)$$

H_s : la hauteur de la zone d'équilibre (ft).

H_z : la longueur de la zone de transfert de masse (ft).

❖ **Calcul de la vitesse actuelle d'écoulement de fluide (U_{act}) [2]**

$$U_{act} = Q / S$$

$$S = (\pi * D_L^2) / 4 \dots \dots \dots (18)$$

$$S = (3.14 * 5.2^2) / 4 = 21.226 \text{ft}$$

D_L : le diamètre du lit. ($D_L = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$).

$$U_{act} = 8652.1 \text{ (ft / hr)} / 21.2269 \text{ (ft}^2\text{)}$$

$U_{act} = 407.618 \text{ (ft/hr)}$

❖ **Calcul le debit d'eau**

$$q_w = (4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}) / (\pi * D_L^2) \dots \dots \dots (19)$$

$q_w = 0.77 \text{ (Lb / ft}^2\text{.hr)}$

❖ **Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse**

$$H_z = (225 * q_w^{0.7895}) / (U_{act}^{0.5506} * Y_{in}^{0.2646}) \dots \dots \dots (20)$$

$H_z = 18.82 \text{ inch} = 1.56 \text{ ft} = 0.47 \text{ m}$

Y_{in} : La teneur en eau dans la charge à l'entrée du déshydrateur exprimée en ppm massique.

q_w : Le débit d'eau .

❖ **Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre**

$$H_s = H_t - H_z \dots \dots \dots (21)$$

$$H_s = 4.34 \text{ ft} = 1.33 \text{ m}$$

H t : la hauteur total du lit ($H t = 1.8 \text{ m} = 5.9 \text{ ft}$).

H z : la hauteur de la zone de transfert de masse.

❖ **Estimation de la capacité d'adsorption à l'équilibre [2]**

La capacité d'adsorption est de 22 Lb d'eau / Lb de tamis moléculaire qui représente la saturation complète du tamis moléculaire. (Voir l'annexe 4).

$$X_s = (22 - X_1)$$

X₁ : la teneur en eau résiduelle, $X_1 = 1.5 \%$ en poids.

A cause des pertes de la capacité lors de l'adsorption engendrée par l'encrassement des pores ; de la destruction des cristaux ; de l'attaque chimique ...etc. il est convenable d'ajouter une quantité de tamis pour compenser l'effet de vieillissement.

Si l'on considère une perte de 5% par an de la capacité d'adsorption avec une durée de vie du tamis égale à trois ans, les pertes seront calculées ainsi :

Coefficient d'usure = 70 %

La capacité sera en fin de compte égale $X_s = (22 - X_1) * 0.7$

Alors :

$$X_s = 14.35 \text{ Lb d'eau / 100 Lb adsorbant}$$

❖ **Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X)**

$$X = X_s * [1 - (C * (H_z / H_s))] \dots\dots\dots (22)$$

$$X = 12.02 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant}$$

C : une constante empirique qu'on prend généralement égale à 0.45 et qui dépend de la forme des particules de tamis moléculaire.

❖ **Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}**

$$M_{ads} = ((H_s - (C * H_z)) * (X_s * D_L^2 * \rho_{tamis})) / 127.38 \dots\dots\dots (23)$$

$$M_{ads} = 1.11 \cdot 10^3 \text{ Lb}$$

❖ Calcul du temps d'adsorption

$$t_{\text{ads}} = 0.01 * X * H_t * \rho_{\text{tamis}} / q_w$$

$$t_{\text{ads}} = 36.80 \text{ hr}$$

❖ Détermination de l'efficacité d'adsorption :

$$\text{Eff} = X / X_s$$

$$\text{EFF} = 83.7$$

III.7.2.2 calcul du bilan thermique [2]

❖ Propriété du gaz de régénération [7]

Tableau III.3 : La composition du gaz de régénération (cas réel)

Composant	X _i en mole	T _{ref} (K)=12.7°C	T _{rec} (K)=280°C	ΔH° (Kj/Kg)	M _i (Kg/Kmole)	X _i '% en poids	ΔH° *X _i ' (Kj/Kg)
C ₁	0.8386	285.85	553.15	698.30	16	0.72	500.69
C ₂	0.0743	285.85	553.15	599.60	30	0.12	71.42
C ₃	0.0186	285.85	553.15	586.64	44	0.04	25.66
iC ₄	0.0026	285.85	553.15	591.34	58	0.01	4.77
nC ₄	0.0008	285.85	553.15	592.58	58	0.00	1.47
iC ₅	0.004	285.85	553.15	585.59	72	0.02	9.01
nC ₅	0.0009	285.85	553.15	586.78	72	0.00	2.03
C ₆	0.0003	285.85	553.15	589.15	86	0.00	0.81
N ₂	0.0557	285.85	553.15	280.49	28	0.08	23.38
CO ₂	0.0024	285.85	553.15	253.63	44	0.01	1.43
He	0.0018	285.85	553.15	0.00	4	0.00	0.00
	1				18.71	1.00	640.66

$$\text{Poids moléculaire du GN : } M_{GN} = \sum Y_i * M_i.$$

$$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg / Kmole}$$

* Le gaz naturel de Réchauffage : T= 280 °C P = 4.5 kg / cm²

* Le gaz naturel de Refroidissement : T= 12.7 °C P = 4.5 kg / cm²

❖ Calcul de la masse volumique du GN dans les conditions normal ρ_{GN}

T=0 °C, P=1 atm.

$$\rho_{GN} = (P * M_{GN}) / (Z * R * T)$$

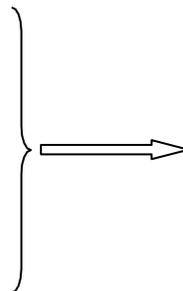
$Z = 1.$

$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg/K mole.}$

$T = 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273.15 \text{ }^\circ\text{K.}$

$P = 1.01351 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ atm.}$

$R = 0.0821 \text{ l.atm / mole. }^\circ\text{K}$



$\rho_{GN} = 0.83 \text{ Kg/Nm}^3$

❖ **Calcul de l'enthalpie de chauffage du gaz de 12.7°C à 280°C [2]**

$\Delta H = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5$

$T = T_{rech} - T_{ref}$

ΔH : l'enthalpie qui fournit par le four exprimée en (KJ / Kg), Tableau (III.3).

T : le gradient de la température de chauffage du gaz de GN en (°K).

A, B, C, D, E, F : Constantes des compositions de GN de corrélation (**voir l'annexe 6**).

$\Delta H = 640.66 \text{ Kj / Kg} = 2.75 \cdot 10^2 \text{ BTU/Lb}$

❖ **Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage du tamis Q_{tamis}**

▪ **Calcul de la masse du tamis m_t**

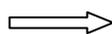
$m_t = \frac{1}{4} * (\pi * D_L^2) * H_t * \rho_{tamis}$

$D_L = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$

$m_t = 8812 \text{ Lb}$

$H_t = 2.1 \text{ m} = 6.89 \text{ ft}$

$\rho_{tamis} = 640 \text{ kg/m}^3 = 39.95 \text{ Lb/ft}^3$



$m_t = 10257.561 \text{ Lb} = 4652 \text{ Kg}$

▪ **Calcul de la température moyenne du lit en fin de chauffage [2]**

$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440.6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K}$

$T_e = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 536 \text{ }^\circ\text{F} = 553 \text{ }^\circ\text{K.}$

⇒ D'après l'équation (6) :

$C_{pt} = 0.22 \text{ BTU/Lb }^\circ\text{f}$

$m_t = 10257.56 \text{ Lb .}$

$T = 253.5 \text{ }^\circ\text{C} = 487.9 \text{ }^\circ\text{F} = 526 \text{ }^\circ\text{K}$

$$T = 253.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 487.9 \text{ } ^\circ\text{F} = 526 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

$$T_{\text{ads}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 77 \text{ } ^\circ\text{F}$$

⇒ D'après l'équation (3) :

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

- Calcul de la chaleur nécessaire pour le réchauffage de l'acier

Calcul du volume de l'acier (V_c) [2]

$$V_c = (S_{\text{ext}} - S_{\text{int}}) * L .$$

Avec :

V_c : Le volume total de l'acier (ft)

S_{ext} : La surface externe de la paroi du sécheur (ft²).

S_{int} : La surface interne de la paroi du sécheur (ft²)

L : La hauteur de la colonne (ft)

$$V_c = (\pi/4) * [(d + (2 * E_p))^2 - d^2] * L.$$

$$V_c = \pi [E_p * (d + E_p)] * L$$

E_p : L'épaisseur de l'acier. $E_p = 0.12 \text{ ft} = 36.8 \text{ mm}$.

d : Le diamètre de l'acier. $d = 6.89 \text{ ft} = 2100 \text{ mm}$.

$L = 15.19 \text{ ft} = 4630 \text{ mm}$.

$$V_c = 1.13 \text{ m}^3 = 40.12 \text{ ft}^3$$

Calcul de la masse de l'acier m_c

$$m_c = V_c * \rho_{\text{acier}} .$$

ρ_{acier} : La masse volumique de l'acier (Lb / ft³).

$$V_c = 40,12 \text{ ft}^3.$$

$$\rho_{\text{acier}} = 500 \text{ Lb} / \text{ft}^3$$

$$m_c = 2 \cdot 10^4 \text{ Lb}$$

On doit ajouter la quantité d'acier relatives aux supports, aux pipes et aux brides estimées à 35% (accessoires) .

Donc :

$$m_c = 2.7 \cdot 10^4 \text{ Lb}$$

C_{p_c} : La capacité calorifique de l'acier (BTU / lb. °F) $C_{p_c} = 0.12 \text{ BTU / lb. °F}$. [4].

$$m_c = 2.7 \cdot 10^4 \text{ Lb.}$$

⇒ D'après l'équation (4) :

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 1.11 \cdot 10^3 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$.

⇒ D'après l'équation (4) :

$$Q_{\text{des}} = 2 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul des perte de chaleur Q_{perte}

$$Q_{\text{des}} = 2 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

⇒ D'après l'équation (5) :

$$Q_{\text{perte}} = 3.74 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale}

⇒ D'après l'équation (1) :

$$Q_{\text{totale}} = 4.11 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ **Calcul de la chaleur fournie par le four pendant le réchauffage H_f [2]**

▪ **Calcul de l'efficacité thermique du four $1/\epsilon$ [2]**

Efficacité thermique du four pendant le réchauffage :

$$1/\epsilon = 2.25 + (0.03113 * T)$$

T : Temps de chauffage (hr).

$$\Rightarrow \boxed{1/\epsilon = 0.38}$$

▪ **Calcul de la chaleur totale fournie par le four lors de réchauffage H_f**

⇒ D'après l'équation (7) : à partir le tableau (III.1) :

$$H_f = Q_{\text{totale}} / (1/\epsilon)$$

$$1/\epsilon = 0.38$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.11 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$\Rightarrow \boxed{H_f = 1.08 \cdot 10^7 \text{ BTU}}$$

▪ **Calcul du temps de réchauffage du tamis « tr » [2]**

Tableau III.4 : Représentation des données de réchauffage du tamis

Quantité de chaleur apporté par le GN: H_f (BTU)	1.08 10^7
Déférence de L'enthalpie ($\Delta H_{(280-12.7)^\circ\text{C}}$: BTU / Nm ³)	1179,47
Masse volumique du ρ_{GN} (Lb/ Nm ³)	1,8298
Température finale (T_f : °F)	536
Température initiale (T_i : °F)	54,86

Pour ΔH en Kj/ Nm³: $\Delta H = \Delta H (\text{Kj/ Kg}) * \rho_{GN}$

$$\Delta H = 640.66 \text{ Kj/ Kg.}$$

$$\rho_{GN} = 0.83 \text{ Kg/ Nm}^3 = 1,83 \text{ Lb/ Nm}^3.$$

$$\boxed{\Delta H = 504,34 \text{ BTU/ Nm}^3}$$

⇒ D'après l'équation (8): $t_r = H_f / \Delta H * M_{GN}$

$$H_f = 1.08 \cdot 10^7 \text{ BTU}$$

$$\Delta H = 504,34 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$M_{GN} = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

$$\Rightarrow \boxed{t_r = 10,7 \text{ hr}}$$

H_f : La chaleur fournie par le four pour le GN exprimée en (BTU / Nm³).

M_{GN} : Le débit du GN sortant du four exprimé en (Nm³/hr).

$\Delta H_{(T_e - T_{ads})}$: La différence de l'enthalpie du gaz (BTU / Nm³)

❖ **Calcul de la chaleur fournie par le four par de H_f / CYCLE [2]**

$$t_r = 10,7 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1.08 \cdot 10^7 \text{ BTU.}$$

$$t_{ads} = 36,8 \text{ hr.}$$

⇒ D'après l'équation (9) :

$$H_f / \text{CYCLE} = 3.14 \cdot 10^6 \text{ BTU /}$$

❖ **Calcul du temps de refroidissement du tamis « tref »**

⇒ D'après l'équation (10) :

$$Q_{\text{totale}} = 4.11 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 10,7 \text{ hr.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,53 \text{ hr} \cong 5 \text{ hr}$$

❖ **Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}**

⇒ D'après l'équation (11):

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.13 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ref}} = 4,53 \text{ hr.}$$

$$Q_{\text{ref}} = 3.85 \cdot 10^5 \text{ BTU/ hr}$$

III.7.2.3 Calcul du bilan de matière de la régénération [2]

❖ **Calcul du débit du gaz de refroidissement**

⇒ D'après l'équation (12) $M_{\text{ref}} = Q_{\text{ref}} / \Delta H_{(T_s - T_e)}$

$$Q_{\text{ref}} = 3.85 \cdot 10^5 \text{ BTU/ hr.}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 507,42 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440.6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_e = 12.7 \text{ }^\circ\text{C} = 54.86 \text{ }^\circ\text{F} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$M_{\text{ref}} = 7.6 \cdot 10^2 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

❖ Calcul des pertes des charges [2]

Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_1$ pour le GN chaud❖ Le gaz naturel de Réchauffage : $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2$$

- Calcul de la masse volumique du GN

$$\rho_{GN} = (P * M_{GN}) / (Z * R * 1)$$

- Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

Le facteur de compressibilité est calculé par la formule suivante :

$$Z = 1.046 - (2.034 * 10^{-9}) * P + (4.571 * 10^{-8}) * P^2.$$

Avec P est la pression du travail exprimé en Psia.

$$Z = 1.03 \text{ Kg / m}^3.$$

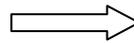
$$Z = 1.03$$

$$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg / K mole.}$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C} = 553 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2 = 4.44 \text{ atm.}$$

$$R = 0.082 \text{ L. atm / mole. }^\circ\text{K.}$$



$$\rho_{GN} = 1.77 \text{ Kg / m}^3.$$

❖ Calcul de la vitesse superficielle U_1 à Travers le lit [2]

$$S = (\pi * D^2) / 4 = 5.411 \text{ ft}^2 \quad (\text{Voir l'annexe 2})$$

$$\rho_{GN} = 1.77 \text{ Kg / Nm}^3 = 0.11 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3.68 * 10^3 \text{ Lb / hr}$$

$$U_1 = M_g / (60 * S * \rho_{GN})$$

$$U_1 = 103.09 \text{ ft / min.}$$

❖ Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2 = 450 \text{ Kpas}$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0.64.$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.043 \text{ Lb / ft .hr} . \text{ (Voir annexes 6).}$$

⇒ D'après l'équation (13) :

$$\Delta P/L_1 = 0.22 \text{ psi / ft}$$

❖ Calcul de Re_1

$$D_p = 0.01 \text{ ft} .$$

$$\mu_1 = 0.02 \text{ Cp} = 0.04 \text{ Lb / ft .hr}$$

$$G = M_g / S = 680.37 \text{ Lb/ ft}^2 \text{ .hr}$$

⇒ D'après l'équation (14) :

$$Re_1 = 170.09$$

❖ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid [2]

▪ Calcul du coefficient de compressibilité (Z)

$$Z = f (T_r, P_r)$$

$$T_r = T / T_c$$

$$P_r = P / P_c$$

T_c, P_c : paramètres pseudo critiques.

T_r, P_r : température et pression réduites.

$$T_c = \sum Y_i * T_{ci} \quad T_c = 194.3^\circ\text{K}.$$

$$P_c = \sum y_i * P_{ci} \quad P_c = 45.12 \text{ atm}$$

$$Z = f (T_r = 1.47 ; P_r = 0.1).$$

Et selon l'annexe (7 et 8) :

$$Z = 0.91 \text{ Kg / m}^3.$$

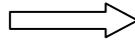
$$Z = 0.91$$

$$M_{GN} = 18.71 \text{ Kg / K mole.}$$

$$T = 12.7^\circ\text{C} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2 = 4.44 \text{ atm.}$$

$$R = 0.082 \text{ l. atm / mole. }^\circ\text{K.}$$



$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg/m}^3.$$

❖ **Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit [2]**

$$S = (\pi * D^2) / 4 = 5.411 \text{ ft}^2$$

$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg / m}^3 = 0.24 \text{ Lb / ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ Lb / hr}$$

$$U_2 = M_g / (60 * S * \rho_{GN})$$

$$U_2 = 17.96 \text{ ft / min.}$$

❖ **Calcul de la viscosité du GN froid μ_2 [2]**

▪ **Calcul de la densité relative d_r et la pression de régénération**

$$P = 4.5 \text{ kg / cm}^2 = 450 \text{ Kpas}$$

$$\text{Le densité relative : } d_r = M_{GN} / M_{air} = 0.64$$

$$T = 12.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb / ft .hr. (Voir annexes 6).}$$

⇒ D'après l'équation (13) :

$$\Delta P / L_2 = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ psi / ft}$$

▪ **Calcul de Re_2**

$$D_p = 0.01 \text{ ft. (Voir annexes 2).}$$

$$\mu_2 = 0.03 \text{ Lb / ft .}$$

$$G = M_g / S = 258.73 \text{ lb / ft}^2 \text{ .hr}$$

⇒ D'après l'équation (14) :

$$Re_2 = 86.24$$

III.7.2.4 Récapitulation des résultats

Tableau III.5 : Représentation des valeurs de design et des valeurs calculées

Les valeurs calculées	Les valeurs de design
$M_t = 4652.75 \text{ Kg}$	$M_t = 4653 \text{ Kg}$
$H_t = 2.1 \text{ m}$	$H_t = 2.1 \text{ m}$
$H_f = 2.72 \cdot 10^6 \text{ Kcal /hr}$	$0.15 \cdot 10^6 < H_f < 3.3 \cdot 10^6 \text{ Kcal /hr}$
$t_r = 10.7 \text{ hr}$	$t_r = 11 \text{ hr}$
$t_{ref} = 4.53 \text{ hr}$	$t_{ref} = 5 \text{ hr}$
$M_g = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ $M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr}$	$1000 < \text{Débit} < 2500 \text{ Nm}^3/\text{hr}$
$\Delta P_1 / L = 0.22 \text{ psi /ft}$ $\Delta P_2 / L = 0.017 \text{ psi /ft}$	$0.01 < \Delta P / L < 0.25 \text{ psi /ft}$
$Re_1 = 170.09$ $Re_2 = 86.24$	$Re > 100$
$t_{ads} = 36.80 \text{ hr}$	$t_{ads} = 36 \text{ hr}$

Suite à la mise en oeuvre de la méthode de calcul établie, il apparaît clairement que cette dernière est valable et justifiée, compte tenu des résultats obtenus.

En effet la perte de charge se trouve dans l'intervalle recommandé où on peut effectuer l'opération de régénération sans soulever le lit, ainsi que la quantité de chaleur fournie par le four.

Le régime d'écoulement est turbulent, donc il favorise un bon transfert de masse et une meilleure distribution du gaz à travers le sécheur.

Les marges du design citées étant respectées nous pouvons désormais passer à l'application de notre méthode de calcul dans le cas où la teneur en eau dans la charge est de l'ordre de 25 ppm qui est notre première solution à étudier.

III.8 Etude de la première solution [2]

En vue d'optimiser le temps d'adsorption, on procède au calcul du temps pour 25 ppm.

III.8.1 Calcul le débit d'eau

$$q_w = (4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}) / (\pi * D_L)$$

D_L : le diamètre du lit. ($D_L=2.1 \text{ m}=6.89 \text{ ft}$). (Voir annexes 7).

Y_{in} : La teneur en eau dans la charge à l'entrée du déshydrateur exprimée en ppm massique

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ft^3)

Q : Débit volumique de la charge (ft^3/hr).

Y_{in} : la teneur en eau dans la charge de GPL, $Y_{in} = 25 \text{ ppm}$

$$q_w = 0,19 \text{ (Lb/ft}^2\text{.hr)}.$$

Un débit d'eau faible par rapport au débit d'eau calculé précédemment à cause de la chute de la teneur d'eau dans la charge.

III.8.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse [2]

$$H_z = (225 * q_w^{0.7895}) / (U_{act}^{0.5506} * Y_{in}^{0.2646})$$

q_w : le débit d'eau en $\text{Lb}/\text{ft}^2\text{.hr}$.

U_{act} : la vitesse actuelle d'écoulement de fluide

Y_{in} : la teneur en eau dans la charge de GPL, $Y_{in} = 25 \text{ ppm}$

$$H_z = 9.09 \text{ inch} = 0.75 \text{ ft} = 0.23 \text{ m}$$

Un débit d'eau faible par rapport au débit d'eau calculé précédemment à cause de la chute de la teneur d'eau dans la charge

III.8.3 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

$$H_s = H_t - H_z$$

H_s : la hauteur de la zone d'équilibre (ft)

H_z : la longueur de la zone de transfert de masse (ft)

H_t : la hauteur total du lit ($H_t=2.1 \text{ m}=6.89 \text{ ft}^3$). (Voir annexes 2).

$$H_s = 5.15 \text{ ft} = 1.57 \text{ m}$$

Contrairement à la zone transfert la zone d'équilibre augmente puisque nous avons gardé la même hauteur de lit

III.8.4 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads} [2]

$$M_{ads} = ((H_s - (C * H_z)) * (X_s * D_L^2 * \rho_{tamis})) / 127.38$$

$$M_{ads} = 1187.69 \text{ Lb}$$

X_s : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C, $X_s = 22\%$ en poids (voir l'annexes 2).

ρ_{tamis} : Masse volumique du tamis

C : Constante relative aux tamis moléculaire.

C'est une quantité d'eau qui devrait être adsorbé par le sécheur mais puisque la section de déshydratation est assez ancienne elle n'a pas la même capacité d'adsorption qui nous oblige d'utiliser un Coefficient de correction $C=0.45$.

III.8.5 Calcul du temps d'adsorption

$$t_{ads} = M_{ads} / (Y_{in} * Q * \rho_{GPL})$$

$$t_{ads} = 164 \text{ hr}$$

Y_{in} : la teneur en eau dans la charge de GPL,

ρ_{GPL} : Masse volumique de la charge (Lb/ ft³)

Q : Débit volumique de la charge (ft³ / hr).

III.8.6 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X)

$$X = X_s * [1 - (C * (H_z / H_s))]$$

X_s : la capacité d'adsorption à l'équilibre neuf à 25°C,

$$X = 13.40 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant}$$

III.8.7 Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$\text{Eff} = X / X_s$$

$$\text{EFF} = 93.36$$

Ce qui est remarquable que la quantité d'eau réelle adsorbée a augmenté qui donne une bonne efficacité d'adsorption

III.8.8 Calcul du bilan thermique [2]

❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q_{des}

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 1187,69 \text{ Lb.}$

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb. (Voir annexes 2).}$

⇒ D'après l'équation (7) :

$$Q_{\text{des}} = 2.14 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul des pertes de chaleur Q_{perte}

On estime les pertes par :

$$Q_{\text{perte}} = 0.1 (Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{tamis}})$$

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{des}} = 2.1 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

⇒ D'après l'équation (5) :

$$Q_{\text{perte}} = 3.88 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

Q_{des} : la chaleur de désorption

Q_{tamis} : la chaleur de chauffage du tamis

Q_{acier} : la chaleur de chauffage de l'acier

❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q_{totale} [2]

⇒ D'après l'équation (1) :

$$Q_{\text{totale}} = Q_{\text{perte}} + Q_{\text{acier}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{tamis}}$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.27 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

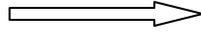
❖ Calcul de la chaleur fournie par le four H_f [5].

⇒ D'après l'équation (7) :

$$H_f = Q_{\text{totale}} / (1/\varepsilon)$$

$$1/\varepsilon = 0.38$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.27 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$



$$H_f = 1.12 \cdot 10^7 \text{ BTU / hr}$$

❖ Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r »

⇒ D'après l'équation (8) :

$$t_r = H_f / \Delta H * M_{GN}$$

M_{GN} : La quantité de chaleur du GN sortant du four exprimé en (Nm^3/hr).

$\Delta H (T_e - T_{ads})$: La différence de l'enthalpie du gaz de réchauffage (BTU / Nm^3)(Voir annexes 5).

$$H_f = 1.12 \cdot 10^7 \text{ BTU / hr}$$

$$\Delta H = 507,3 \text{ BTU / Nm}^3.$$

$$M_{GN} = 2000 \text{ Nm}^3/hr.$$



$$t_r = 11.14 \text{ hr}$$

❖ Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle H_f / CYCLE [2]

$$t_r = 11.14 \text{ hr.}$$

$$H_f = 1.12 \cdot 10^7 \text{ BTU / hr.}$$

$$t_{ads} = 164 \text{ hr.}$$

⇒ D'après l'équation (9) :

$$H_{f/CYCLE} = 7.63 \cdot 10^5 \text{ BTU / hr}$$

❖ Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} »

⇒ D'après l'équation (10) :

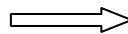
$$t_{ref} = ((Q_{\text{tamis}} + Q_{\text{acier}}) / Q_{\text{totale}}) * t_r$$

$$Q_{\text{totale}} = 4.27 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 11.14 \text{ hr.}$$



$$T_{ref} = 4,55 \text{ hr} \cong 5 \text{ hr}$$

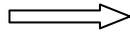
❖ Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref} [2]

⇒ D'après l'équation (11) :

$$Q_{acier} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU} .$$

$$Q_{tamis} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU} .$$

$$T_{ref} = 4,55 \text{ hr} .$$



$$Q_{ref} = 3.83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr}$$

III.8.9 Calcul du bilan de matière de la régénération

❖ Calcul du débit du gaz de refroidissement [2]

⇒ D'après l'équation (12) :

$$M_{ref} = Q_{ref} / \Delta H_{(T_s - T_e)}$$

M_{ref} : Le débit du gaz de refroidissement (Lb/ hr).

Q_{ref} : la chaleur soutirée au système. (BTU/ hr).

T_E : la température d'entrée du gaz de refroidissement (°F).

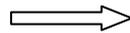
$\Delta H_{(T_s - T_e)}$: La différence de l'enthalpie du gaz de refroidissement (BTU / Nm³)

$$Q_{ref} = 3.83 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr} .$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 504,3 \text{ BTU/Nm}^3 .$$

$$T_S = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440.6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K} .$$

$$T_E = 12.7 \text{ }^\circ\text{C} = 54.86 \text{ }^\circ\text{F} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K} .$$



$$M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} .$$

III.8.10 Calcul des pertes de charges

❖ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L1$ pour le GN chaud [2]❖ Calcul de la vitesse superficielle U_1 à travers le lit

$$S = (\pi * D^2) / 4 = 5.41 \text{ ft}^2 .$$

$$\rho_{GN} = 1.77 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 0.11 \text{ Lb} / \text{ft}^3 .$$

$$M_g = 2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr} = 3.68 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{hr} .$$

$$U_1 = M_g / (60 * S * \rho_{GN})$$

$$U_1 = 103.09 \text{ ft} / \text{min} .$$

❖ Calcul de la viscosité du GN chaud μ_1 [2]

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

$$P = 450 \text{ Kpas .}$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0.64$$

$$T = 280 \text{ }^\circ\text{C .}$$

$$\mu_1 = 0.02 C_P . \quad (\text{Annexe 6}).$$

⇒ D'après l'équation (13) :

$\Delta P/L$: la perte de charge par unité de longueur (psi / ft).

μ_1 : la viscosité du GN (Cp) .

U_1 : la vitesse superficielle (ft / min).

ρ_{GN} : la masse volumique du GN (Lb/ ft³).

A et B : des constantes relatives aux dimensions des particules du tamis.

$$A = 0.0561, B = 0.0000889.$$

$$\Delta P/L_1 = 0.22 \text{ psi / ft .}$$

❖ Calcul de Re_1

$$D_P = 0.01 \text{ ft .}$$

$$\mu_1 = 0.02 C_P = 0.04 \text{ Lb /ft. hr. (Voir annexes 5).}$$

$$G = M_g/S = 680.37 \text{ Lb/ft}^2 \cdot \text{hr.}$$

⇒ D'après l'équation (14) :

$$Re_1 = 170.09$$

❖ Calcul de la perte de charge $\Delta P/L_2$ pour le GN froid [2]

❖ Calcul de la vitesse superficielle U_2 à travers le lit

$$S = (\pi * D^2) / 4 = 5.411 \text{ ft}^2.$$

$$\rho_{GN} = 3.88 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 0.24 \text{ Lb} / \text{ft}^3.$$

$$M_g = M_{ref} = 760 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ Lb} / \text{hr}.$$

$$U_2 = M_g / (60 * S * \rho_{GN}) .$$

$$U_2 = 17.96 \text{ ft / mn} .$$

❖ Calcul de la viscosité du GN froid μ_2

Connaissant la densité relative d_r et la pression de régénération :

$$P = 450 \text{ Kpas} .$$

$$d_r = M_{GN} / M_{air} = 0.64$$

$$T = 12.7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb} / \text{ft} . \text{hr. (Voir annexes 5).}$$

⇒ D'après l'équation (13) :

$$\Delta P/L_2 = 0.017 \text{ psi} / \text{ft}.$$

❖ Calcul de Re_2

$$D_p = 0.01 \text{ ft (Voir annexes 2).}$$

$$\mu_2 = 0.01 \text{ Cp} = 0.03 \text{ Lb} / \text{ft} . \text{hr} .$$

$$G = M_g / S = 258.73 \text{ lb} / \text{ft}^2 . \text{hr}.$$

⇒ D'après l'équation (14) :

$$Re_2 = 86.24$$

III.8.11 Interprétation des résultats

D'après tous les résultats obtenus , on a réalisé le but de notre travail en modifiant le temps d'adsorption du déshydrateur de charge de 36 heures (le temps de design), au temps obtenu après les calculs qui correspond à 164 heures

Avec cette augmentation du temps d'adsorption il y'aura :

- * Une diminution de nombre de cycles au temps , par conséquent une augmentation de l'efficacité du tamis .
- * Des pertes de charges pour le réchauffage et le refroidissement vérifiant l'intervalle recommandé .
- * Un régime d'écoulement turbulent qui favorise un bon transfert de masse , ainsi qu'une bonne distribution des gaz à travers le lit .

III.9 Etude de la deuxième solution

Cette solution est basée sur l'optimisation des paramètres de la régénération sans modifier le cycle d'adsorption (36 hr) .

On veut étudier l'impact de du temps de chauffage sur la quantité de chaleur nécessaire à la régénération du sécheur est celle fournie par le four par cycle .

III.9.1 Calcul le débit d'eau [2]

$$q_w = (4 * Y_{in} * Q * \rho_{GPL}) / (\pi * D_L)$$

Y_{in} : la teneur en eau dans la charge de GPL, $Y_{in} = 25$ ppm.

$q_w = 0,19 \text{ (Lb/ft}^2 \cdot \text{hr)}$

III.9.2 Calcul de la hauteur de la zone de transfert de masse [2]

$$H_z = (225 * q_w^{0.7895}) / (U_{act}^{0.5506} * Y_{in}^{0.2646})$$

$H_z = 9.09 \text{ inch} = 0.75 \text{ ft} = 0.23 \text{ m}$

III.9.3 Estimation de la quantité d'eau adsorbée M_{ads}

$$M_{ads} = ((H_s - (C * H_z)) * (X_s * D_L^2 * \rho_{tamis})) / 127.38$$

$M_{ads} = 258.35 \text{ Lb}$

III.9.4 Calcul de la hauteur de la zone d'équilibre

$$H_s = H_t - H_z \dots\dots\dots (21)$$

$H_s = 5.15 \text{ ft} = 1.56 \text{ m}$

III.9.5 Estimation de la quantité réelle d'eau adsorbée par 100 Lb de dessicant (X)

$$X = X_s * [1 - (C * (H_z / H_s))]]$$

$$X = 13,39 \text{ Lb d'eau / 100 Lb de dessicant}$$

III.9.6 Détermination de l'efficacité d'adsorption

$$\text{Eff} = X / X_s$$

$$\text{EFF} = 0,93$$

III.9.7 Calcul du bilan thermique [2]

❖ Calcul de la chaleur nécessaire à la désorption Q des

La quantité d'eau adsorbée $M_{\text{ads}} = 258.35 \text{ Lb}$.

La chaleur de désorption $\Delta H = 1800 \text{ BTU/Lb}$.

⇒ D'après l'équation (2) :

$$Q_{\text{des}} = 4.65 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

❖ Calcul des pertes de chaleur Q perte

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{des}} = 4.64 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

⇒ D'après l'équation (5) :

$$Q_{\text{perte}} = 2.21 \cdot 10^5 \text{ BTU}$$

❖ Calcul de la chaleur totale nécessaire à la régénération Q totale [2]

⇒ D'après l'équation (1) :

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

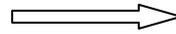
❖ Calcul de la chaleur fournie par le four H_f [5]

⇒ D'après l'équation (7) :

$$H_f = Q_{\text{totale}} / (1/\varepsilon)$$

$$1/\varepsilon = 0.3898.$$

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$



$$H_f = 6.23 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul du temps de réchauffage du tamis « t_r » [2]

⇒ D'après l'équation (8) :

$$H_f = 6.23 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

$$\Delta H = 504.30 \text{ BTU/Nm}^3.$$

$$M_{GN} = 2000 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$



$$t_r = 6,17 \text{ hr}$$

❖ Calcul de la chaleur fournie par le four par cycle H_F/CYCLE [2]

$$t_r = 6,17 \text{ hr.}$$

$$H_f = 6.23 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$t_{\text{ads}} = 36 \text{ hr.}$$

⇒ D'après l'équation (9) :

$$H_F/\text{CYCLE} = 1.06 \cdot 10^6 \text{ BTU}$$

❖ Calcul du temps de refroidissement du tamis « t_{ref} »

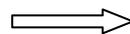
⇒ D'après l'équation (10) :

$$Q_{\text{totale}} = 2.43 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{acier}} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{\text{tamis}} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$t_r = 6,13 \text{ hr.}$$



$$T_{\text{ref}} = 4.4 \text{ hr}$$

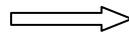
❖ Calcul de la chaleur soutirée au système Q_{ref}

⇒ D'après l'équation (11) :

$$Q_{acier} = 1.03 \cdot 10^6 \text{ BTU.}$$

$$Q_{tamis} = 7.14 \cdot 10^5 \text{ BTU.}$$

$$T_{ref} = 4.4 \text{ hr.}$$



$$Q_{ref} = 3.9 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr}$$

III.9.8 Calcul du bilan de matière de la régénération [2]

❖ Calcul du débit du gaz de refroidissement

⇒ D'après l'équation (12) :

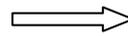
$$M_{ref} = Q_{ref} / \Delta H_{(T_s - T_e)}$$

$$Q_{ref} = 3.9 \cdot 10^5 \text{ BTU/hr.}$$

$$\Delta H_{(T_s - T_e)} = 507,42 \text{ BTU/ Nm}^3.$$

$$T_s = 227 \text{ }^\circ\text{C} = 440.6 \text{ }^\circ\text{F} = 500 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$T_e = 12.7 \text{ }^\circ\text{C} = 54.86 \text{ }^\circ\text{F} = 285.7 \text{ }^\circ\text{K.}$$



$$M_{ref} = 768.59 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

III.9.9 Interprétation des résultats

Selon les résultats obtenus, il est clairement appaissant que la durée de régénération est modifiée, une diminution du temps de chauffage jusqu'à 6 heures 10 minutes et une durée de 4 heures 24 minutes pour le refroidissement sans perturber la durée du cycle d'adsorption de 36 heures.

Cette modification présente une économie moins importante d'énergie fournie par le four par cycle de fonctionnement puisque la même quantité de gaz naturel que pour le cycle d'adsorption de 36 hr dépensée pour un cycle d'adsorption plus long.

Au cours de l'étape d'adsorption, les dessiccant sont chargés d'humidité ceci se traduit à l'équilibre par un état de saturation, le dessiccant saturé n'adsorbe plus une régénération doit succéder au chargement au cours de cette dernière l'humidité est éliminer par un chauffage; et dans notre cas où le lit n'est pas totalement saturé le chauffage de la partie sèche du lit devient inutile et peut provoquer la dégradation du tamis et par conséquent diminution de son efficacité; ce résultat est vérifiée quelque soit la teneur d'eau dans la charge.

III.10 Interprétation et Choix de la Solution Optimale

D'après tous les Résultats obtenus, On ne peut optimiser le fonctionnement de la Section de déshydratation de la charge, que par la réalisation de la solution optimale du problème posé qui est : l'augmentation du temps d'adsorption du sécheur.

Cette augmentation présente plus d'avantage pour le système, car elle réduira le nombre de cycles par mois, avec une diminution de nombre de régénération entraînant :

- ↪ Une diminution de gaz naturel consommé lors de la régénération de la séquence de refroidissement.
- ↪ Une diminution de la Chaleur fournie par le four pour la séquence de chauffage Calculée à la base d'une saturation totale du lit, parce que si l'on chauffe un lit qui n'est que partiellement rempli d'eau, l'énergie utilisée pour chauffer un tamis ne contenant pas d'eau est simplement perdue.
- ↪ Une augmentation de la durée de vie du tamis moléculaire.
- ↪ Une perte moins importante lors de la régénération du produit GPL piégé dans le tamis moléculaire.
- ↪ Augmentation de l'efficacité du tamis à cause de la diminution de la destruction des cristaux.

III.11 Comparaison entre les deux Solutions Optimales

III.11.1 Première solution

En fixe le temps de régénération puis en varie le temps d'adsorption.

Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau III.6.

Tableau III.6 : La variation du temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau pour un temps de régénération fixé

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption	36	47.23	64.77	100.05	164
Temps de Réchauffage	11	11	11	11	11
Nombre d'heures par ans	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de Réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération par un an	243	185	135	87	53
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération	22000	22000	22000	22000	22000
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4070000	2970000	1914000	1166000
Gain en GN par ans et par train en Nm ³		1276000	2376000	3432000	4180000

La représentation graphique de la prolongation du temps d'adsorption est illustrée par la figure suivante. Une simple interpolation, nous permet de déterminer le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau dans la charge.

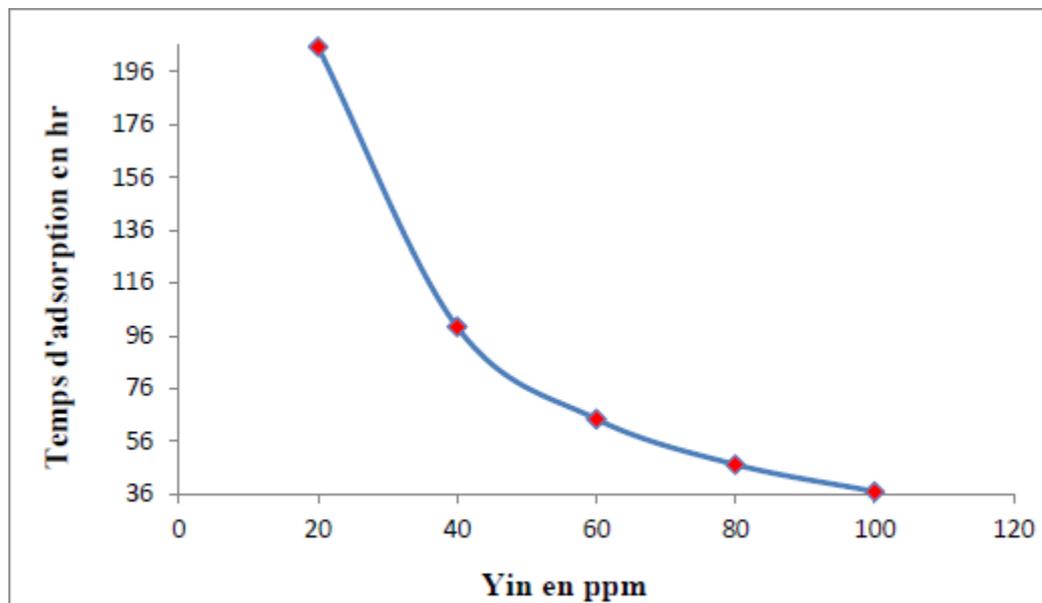


Figure III.2: le temps d'adsorption en fonction de la teneur en eau.

Nous remarquons que le temps d'adsorption augmente avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL.

La figure ci-dessous montre l'augmentation du nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau dans la charge et ce pour une séquence d'adsorption adaptée à cette teneur.

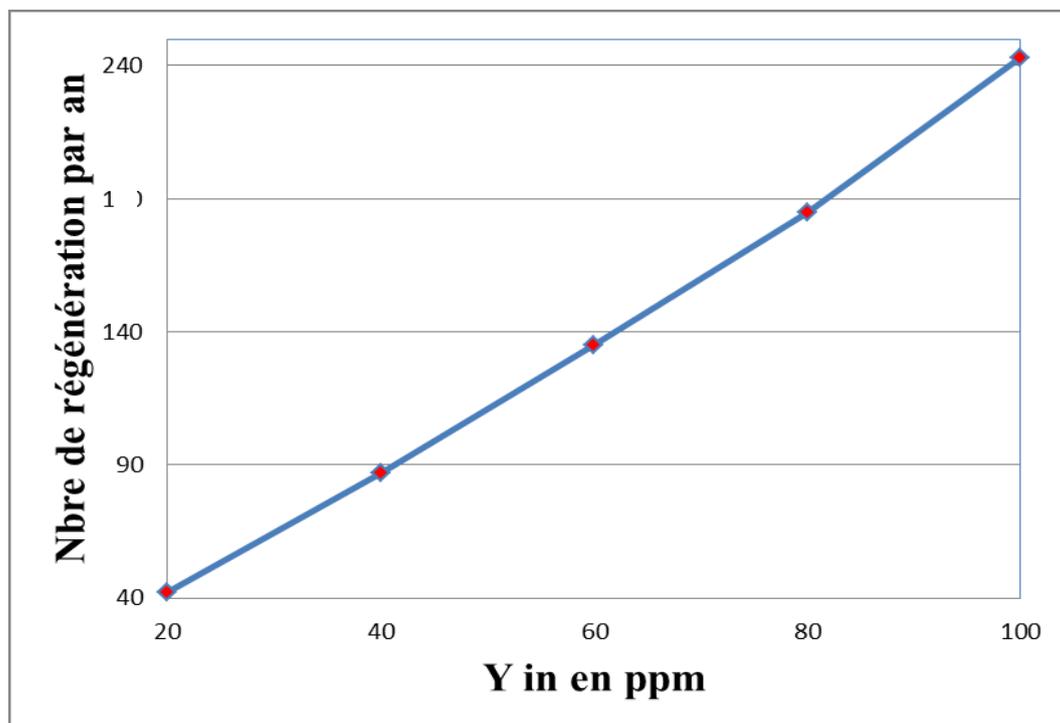


Figure III.3 : le nombre de régénération par an en fonction de la teneur en eau.

Nous remarquons que le nombre de régénération diminue proportionnellement à la teneur en eau dans la charge GPL.

III.11.2 Deuxième solution

En fixe le temps d'adsorption puis en varie le temps régénération.

Les résultats obtenus sont montrés par le tableau III.7.

Tableau III.7 : La variation du temps de régénération en fonction de la teneur en eau pour un temps d'adsorption fixé.

Teneur en eau en ppm	100	80	60	40	25
Temps d'adsorption	36	36	36	36	36
Temps de Réchauffage	11	8.86	7.73	6.64	6.17
Nombre d'heures par ans	8760	8760	8760	8760	8760
Débit de Réchauffage	2000	2000	2000	2000	2000
Nombre de régénération par un an	243	243	243	243	243
Quantité de GN pour le réchauffage pendant une régénération	22000	17720	15460	13280	12340
Quantité de GN pour le réchauffage pendant un an	5346000	4305960	3756780	3227040	2998620
Gain en GN par ans et par train en Nm³		1040040	1589220	2118960	2347380

Le temps de chauffage calculé en fonction de la teneur en eau dans la charge, tout en gardant le temps d'adsorption fixé à 36 h, est illustré par la figure suivante.

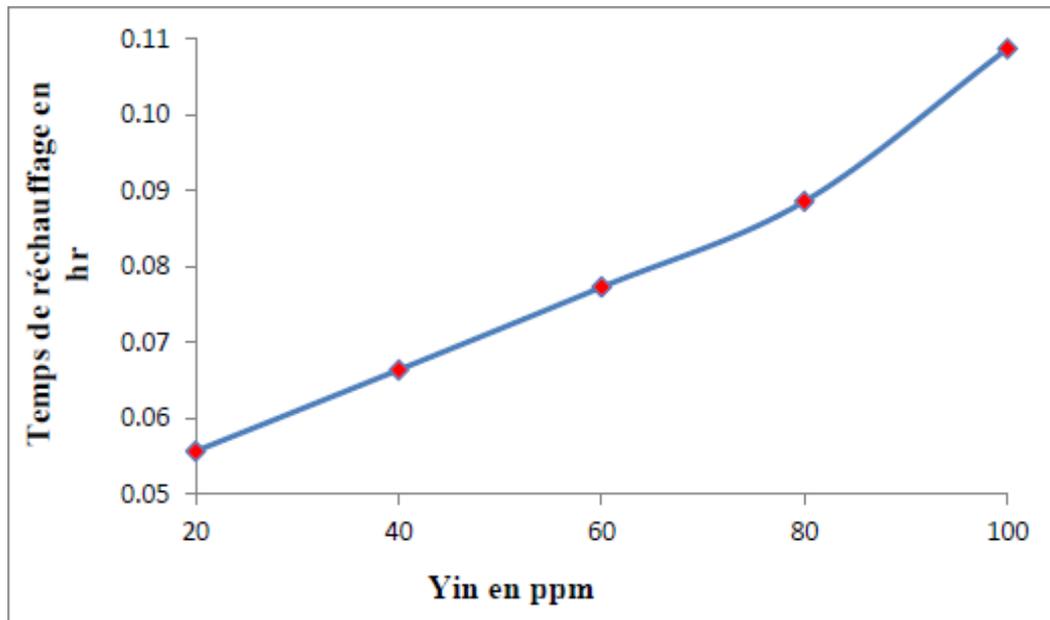


Figure III.4 : Le temps de réchauffage en fonction de la teneur en eau.

Nous remarquons que le temps de réchauffage diminue proportionnellement avec la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL. Cela implique que l'énergie dépensée pour la séquence de chauffage diminue en fonction de la diminution du temps de chauffage et par conséquent en fonction de la diminution de la teneur en eau dans la charge GPL. La figure ci-dessous montre cette conclusion.

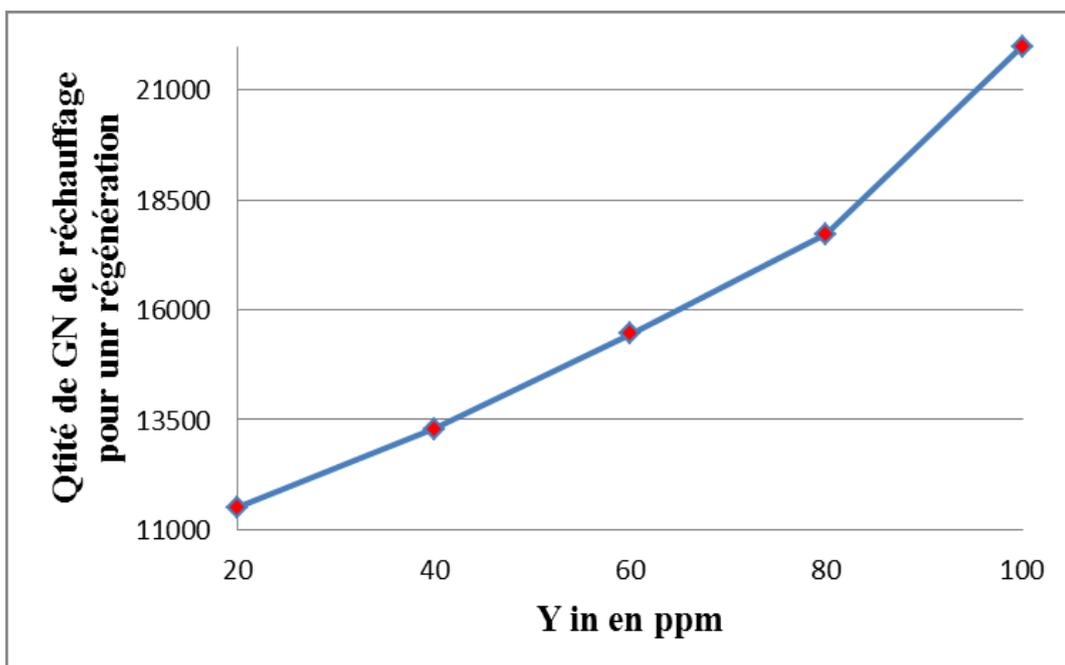


Figure III.5 : Quantité de GN utilisée pendant une régénération en fonction de la teneur en eau pour la deuxième solution .

CHAPITRE IV

Etude technico-économique

IV.1 Introduction

Pour mettre en valeur notre étude, nous avons trouvé intéressant de la finaliser par un calcul économique traduisant les gains qui doit bénéficier le complexe GP1 /Z par la mise en exploitation de nos résultats.

IV.2 Etude économique des résultats de la solution optimale

IV2.1 Gain en Gaz Naturel

Pour un cycle d'adsorption de 164 heures (pour une teneur en eau à l'entrée du déshydrateur de charge égale à 25 ppm maximal et une teneur à la sortie de l'ordre de 5 ppm on a trouvé que le temps d'adsorption s'élève à 164 hr) est détaillé ci-dessous

- Le nombre de cycle /mois = nombre d'heures par mois / durée d'un cycle = $720 / 164 = 5$ cycles.
- Le débit horaire de GN durant :

Le chauffage : $2000 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$.

Le refroidissement : $760 \text{ Nm}^3 / \text{hr}$.

- Le nombre de cycle actuel = $760 / 36 = 20$ cycles.
- Le nombre de cycle gagnés par mois pour un train = (nombre de cycle actuel – le nombre de cycle plus long) = $20 - 5 = 15$ cycles .
- (10.7 heures de réchauffage et 4.53 heures de refroidissement).
- Le gain en GN chaud pour un train par mois = $15 * 10.7 * 2000 = 321000 \text{ Nm}^3$
- Et pour 9 trains = $321000 * 9 = 2889000 \text{ Nm}^3$.
- Le gain en GN froid pour un train par mois = $15 * 4.53 * 760 = 51642 \text{ Nm}^3 / \text{mois}$
- Et pour 9 trains = $51642 * 9 = 464778 \text{ Nm}^3$

$$1.069 \text{ Nm}^3 = 1 \text{ Contra m}^3$$

- Prix unitaire du GN : $10^3 \text{ C/m}^3 = 1341.39 \text{ DA}$
- Le gain en GN pour 9 trains par mois :

$$\text{Le GN de chauffage : } 1.255 * 2889000 = 3.6 * 10^6 \text{ DA.}$$

Le GN de refroidissement : $1.255 \cdot 464778 = 0.58 \cdot 10^6$ DA.

La moitié de la quantité du GN de régénération est récupérée au niveau du four.
Ainsi le gain réel mensuel pour 9 trains sera :

$$(3.6+0.58)/2 \cdot 10^6 = 2.08 \cdot 10^6 \text{ DA}$$

- Le gain réel annuel pour 9 trains par an = $12 \cdot 2.09 \cdot 10^6$
= $25.08 \cdot 10^6$ DA.

IV.2.2 Gain sur la vie du Tamis Moléculaire

- La quantité totale de tamis moléculaire d'un déshydrateur est de 4 653 kg
- Le prix du tamis est de 355.08 DA/kg.
- Un déshydrateur revient 1 652 168 DA ($4653 \cdot 355.08$).
- La durée de vie actuelle du tamis moléculaire est de 3 ans
- Le changement des tamis de la phase I se fait tout les 9 ans du fait qu'il y a 3 déshydrateurs par train.
- Le changement des tamis de la phase II se fait tout les 6 ans du fait qu'il y a 2 déshydrateurs par train.
- Le changement des tamis de la phase III se fait tout les 9 ans du fait qu'il y a 3 déshydrateurs par train.
- Le coût de L'opération de changement du tamis moléculaire d'un déshydrateur chaque année revient :
 - **Pour la phase I** 183 574.2 DA ($1\ 652\ 168/9$).
 - **Pour la phase II** 275 361.3 DA ($1\ 652\ 168/6$).
 - **Pour la phase III** 183 574.2 DA ($1\ 652\ 168/9$).
- - Cela correspond à un cycle de 55 heures (36 heures adsorption et 19 heures de régénération) pour un sécheur.

- Avec un cycle d'adsorption de 183 heures (164 heures adsorption et 19 heures de régénération) la durée de vie du sécheur dans la phase I et la phase III devient :

$$183 \cdot 9 / 55 = 29,9 \text{ ans} \approx 30 \text{ ans}$$

- Le tamis moléculaire de la phase I avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA (1 652 168 /30) soit un gain annuel de 128501,94 DA (183 574,2 - 55072,26).
- la durée de vie du sécheur dans la phase II devient :

$$183 \cdot 6 / 55 = 19,9 \text{ ans} \approx 20 \text{ ans}$$

- Le tamis moléculaire de la phase II avec le nouveau cycle reviendra à 82608,4 DA (1 652 168 /20). Soit un gain annuel de 192752,9 DA (275 361,3 - 82608,4).
- Le tamis moléculaire de la phase III avec le nouveau cycle reviendrait à 55072,26 DA (1 652 168 /30) soit un gain annuel de 128501,94 DA (183 574,2 - 55072,26).
- Un gain annuel total pour le complexe de 3469552.34 DA

$$[(128501,94 \cdot 12) + (192752,9 \cdot 4) + (128501,94 \cdot 9)].$$

IV.2.3 Discussion des résultats

Tableau IV.1 : les résultats

	cycle calculé
Gain réel en GN annuel pour 9 trains par an en DA	25,08 10⁶
Gain en vie des tamis annuel total pour le complexe en DA	3,47 10⁶

Conclusion générale

Conclusion générale

Les préoccupations au niveau du complexe GP1/Z étant de ramener la teneur en eau dans l'alimentation d'une valeur maximale de 100 ppm à 1 ppm dans la section de déshydratation.

Il nous a paru indispensable lors de notre formation d'étudier ce problème en vue d'optimiser les paramètres de fonctionnement de la section déshydratation de charge.

Un temps plus grand d'adsorption entraîne un gain en énergie puisque la même quantité de gaz naturel que pour le cycle d'adsorption actuel sera dépensée pour un cycle plus long.

En plus du gain obtenu en GN, un gain supplémentaire est réalisé dans :

- La durée de vie du tamis va être plus longue du fait que le vieillissement du tamis est dû surtout au dépôt de coke à haute température.

Avec l'augmentation du temps d'adsorption, le nombre de régénération est moindre donc le tamis est moins exposé à hautes températures lors de la séquence de chauffage.

- La durée de vie du matériel est plus longue du fait qu'avec un nombre de cycles moins important, le matériel est exposé à moins de contraintes de pression (moins de séquence de pressurisation et dépressurisation) et de contraintes de température (réchauffage et refroidissement).
- La durée de vie de la robinetterie comme les séquences sont gérées par les ouvertures et fermetures des vannes.

Cette optimisation nous permet d'économiser une quantité annuelle de GN de $4.02 \cdot 10^7$ Nm³ qui se traduit par une valeur de 25.08106 DA avec un gain annuel de valeur de 3,47 106 DA pour les tamis moléculaires.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques



[1] ARBI Bouziane, Optimisation du fonctionnement de la section Déshydratation de charge au niveau de complexe GP1/Z Session Avril 2018 / Groupe : Génie de gaz.



[2] HAMADOUCHE Djamel, Optimisation du fonctionnement de la section déshydratation du complexe GP1Z



[3] HOCINI Nour el Houda, Etude d'un système de vaporisation du GPL au niveau de L'unité GPL-2/ CIS-HMD.



[4] Document GP1/Z, Typical physical propriété de Tamis Moléculaire.



[5] Formation perfectionnement d'ingénieur.



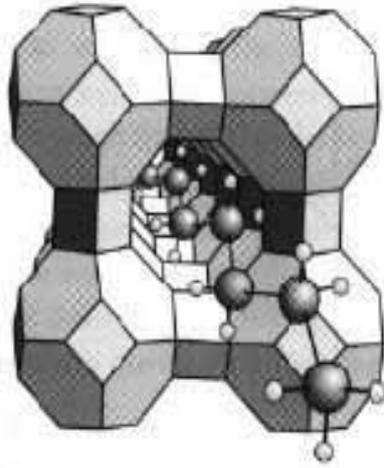
[6] Manuel opératoire ; section déshydratation. Document GP1-Z



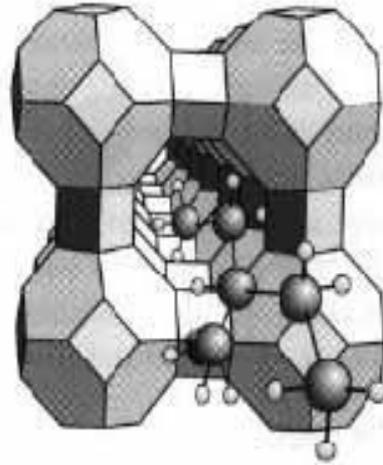
[7] Sherwood ; proprieties of gaz and liquids.

ANNEXES

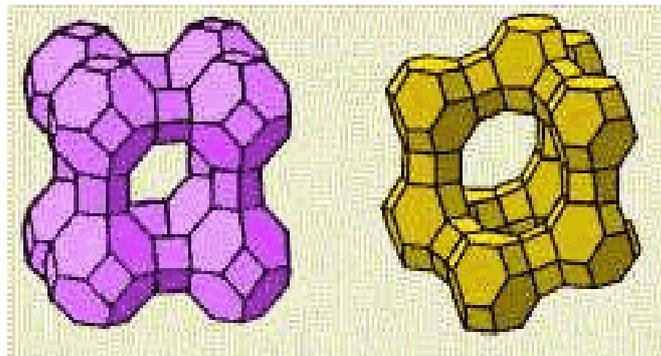
Annexe 1 : Tamis moléculaires



Structure de zéolithe de type A

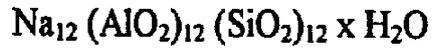


Structure de zéolithe de type X



**Annexe 2 : PROPRIETES PHYSIQUE DE L'ADSORBANT
(TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES)**

CHEMICAL FORMULA



Conditions d'expédition

Le tamis moléculaire de type 4A-DG TRISIV 1/8 est disponible sous forme de granulés de 3,2 mm. Il est expédié sous containers acier, d'un poids net de 135 kg le container.

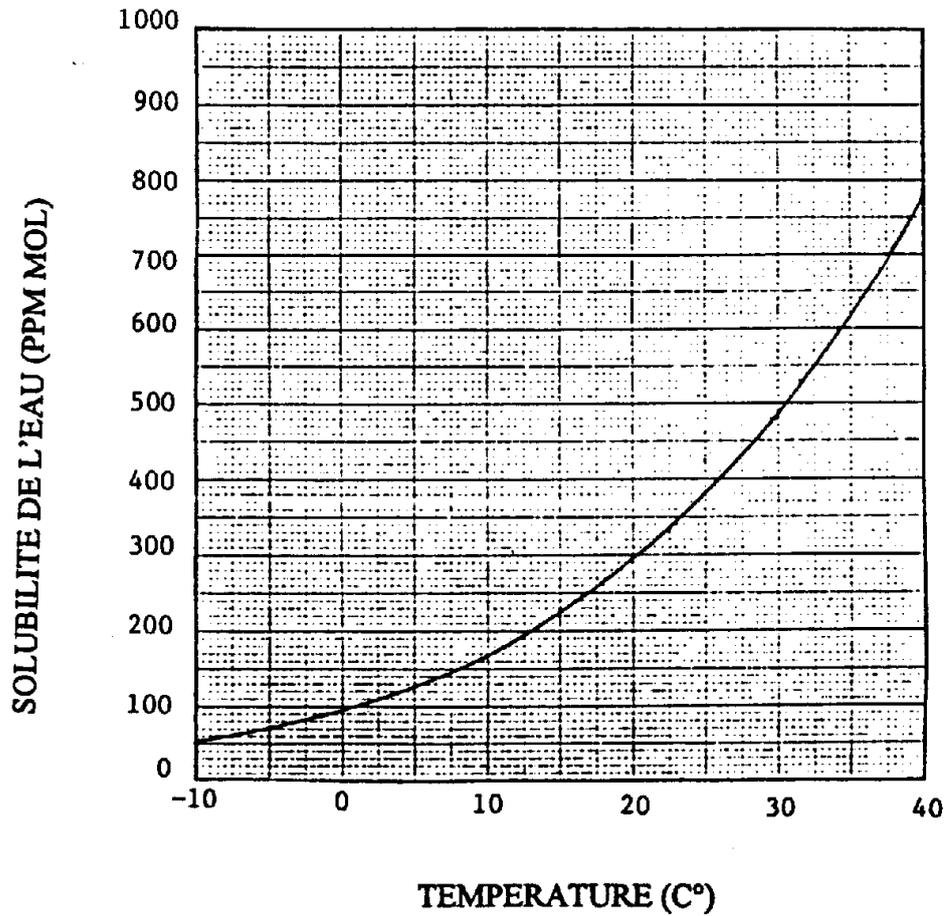
Propriétés typiques	Granulés 1/8"
Diamètre nominal des pores	4 angströms
Densité "non tassé" (moyenne)	640 kg/cm ³
Densité "tasse"	624 à 657 kg/m ³
Diamètre particule	3,2 mm
Résistance à l'écrasement	6,8 à 7,7 kg
Chaleur d'adsorption (max.)	1.000 kcal/kg H ₂ O
Capacité en eau à l'équilibre*	22% en poids
Teneur en eau (à l'emballage)	1,5% en poids

* En Lbs d'eau/100 lbs d'adsorbant activité à 17,5 mm Hg, 25°C.

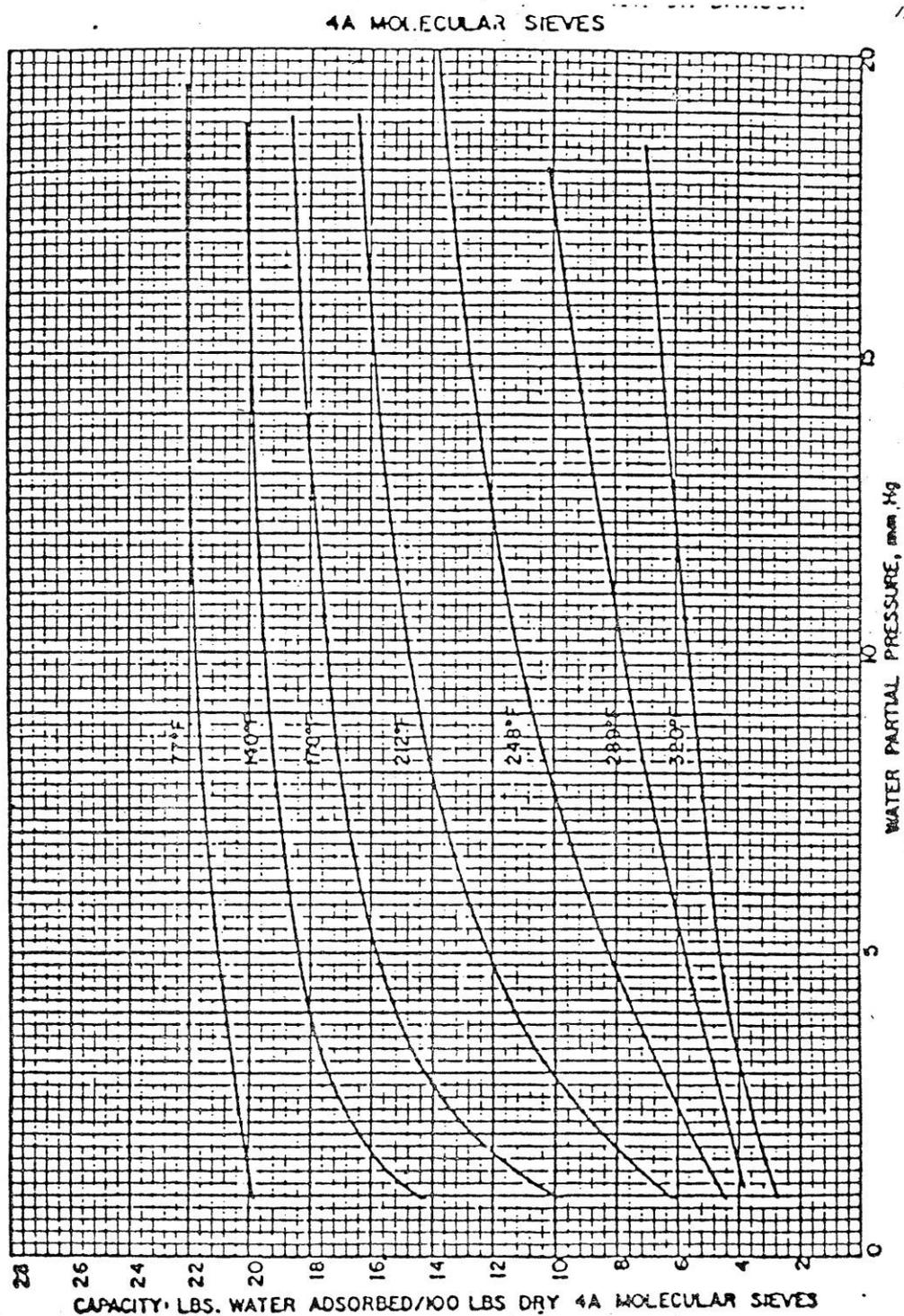
Annexe 3 : solubilité de l'eau dans la charge

SOLUBILITE DE L'EAU DANS LA CHARGE DE GPL

- Note 1. Calcul selon la procédure API
2. Source de charge = 13 (moyenne)



Annexe 4 : Capacité d'adsorption de l'eau en fonction de température



Annexe 5 : Coefficient de l'équation d'enthalpie H°

Tableau 2.1 - Coefficients des équations du pouvoir calorifique, de l'enthalpie et de l'entropie des mélanges de gaz parfaits.

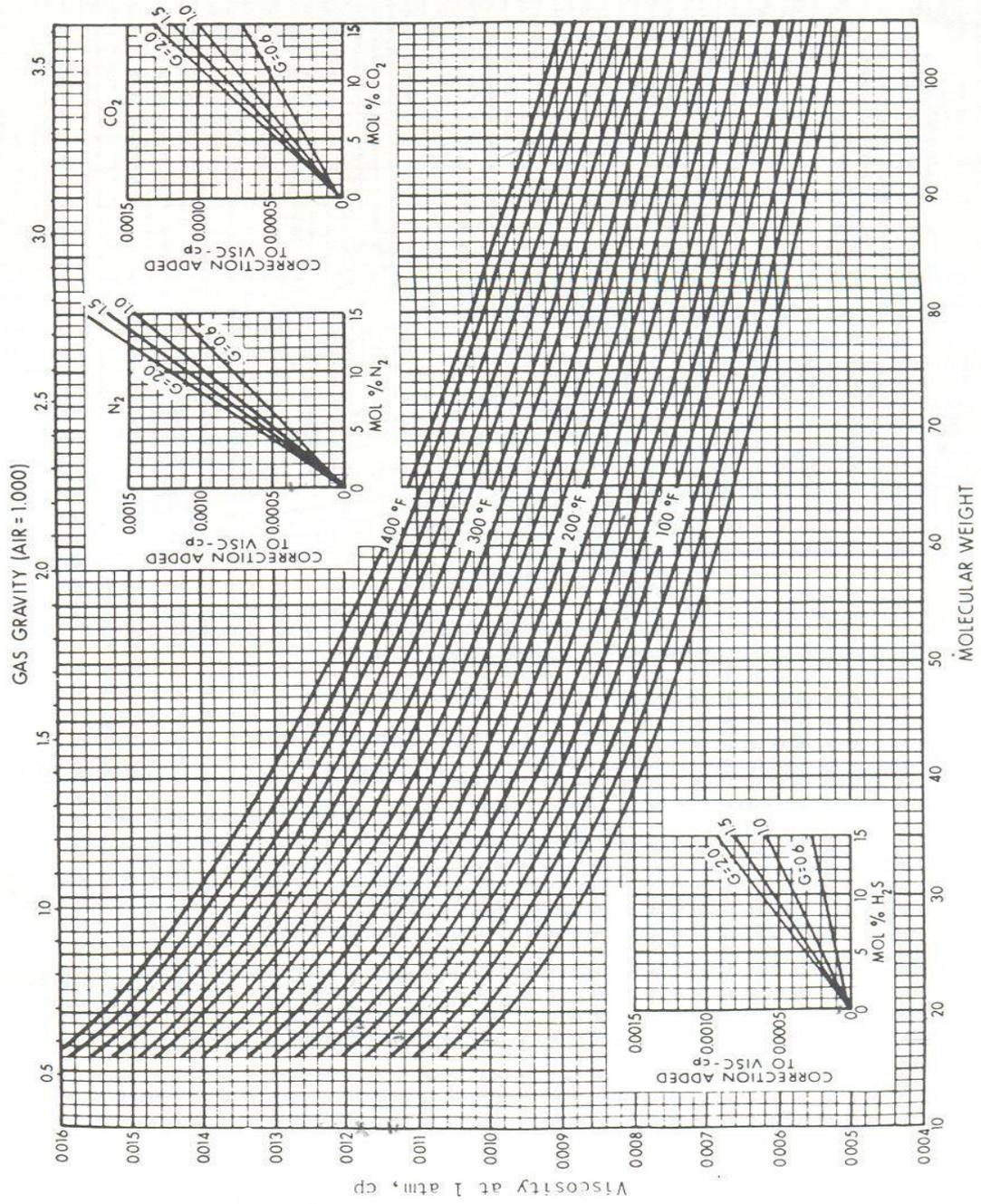
No. CPT	Composant	A	B	C x 10 ³	D x 10 ⁶	E x 10 ⁸	F x 10 ¹⁰	G	Intervalle °C
<i>Non-Hydrocarbonés</i>									
1	Oxygène	-2,283574	0,952440	-0,281140	0,655223	-0,452316	1,087744	2,080310	-175 to 1200
2	Hydrogène	28,671997	13,396156	2,960131	-3,980744	2,661667	-6,098663	-11,801371	-175 to 1200
3	Eau	-5,729915	1,915007	-0,395741	0,876232	-0,495086	1,038613	0,702815	-175 to 1200
4	Sulfure d'hydrogène	-1,437049	0,998865	-0,184315	0,557087	-0,317734	0,636644	1,394812	-175 to 1200
5	Azote	-2,172507	1,068490	-0,134096	0,215569	-0,078632	0,069850	1,805409	-175 to 1200
6	Ammoniac	-2,202606	2,010317	-0,650061	2,373264	-1,597595	3,761739	0,990447	-175 to 1200
7	Carbone	9,572700	-0,199901	1,535456	0,267516	-0,811532	2,726889	1,687611	-175 to 1200
8	Monoxyde de carbone	-2,269176	1,074015	-0,172664	0,302237	-0,137533	0,200365	2,018445	-175 to 1200
9	Dioxyde de carbone	11,113744	0,479107	0,762159	-0,359392	0,084744	-0,057752	2,719180	-175 to 1200
10	Dioxyde de soufre	3,243188	0,461650	0,248915	0,120900	-0,188780	0,568232	2,086924	-175 to 1200
<i>Paraffines</i>									
11	Méthane	-16,228549	2,393594	-2,218007	5,740220	-3,727905	8,549685	-0,339779	-175 to 1200
12	Ethane	-0,049334	1,108992	-0,188512	3,965580	-3,140209	8,008187	1,995889	-175 to 1200
13	Propane	-1,717565	0,722648	0,708716	2,923895	-2,615071	7,000545	2,289659	-175 to 1200
14	n-Butane	17,283134	0,412696	2,028601	0,702953	-1,025871	2,883394	2,714861	-75 to 1200
15	2-Méthylpropane	26,744208	0,195448	2,523143	0,195651	-0,772615	2,386087	3,466595	-75 to 1200
16	n-Pentane	63,201677	-0,011701	3,316498	-1,170510	0,199648	-0,086652	4,075275	-20 to 1200
17	2-Méthylbutane	64,252075	-0,131900	3,541156	-1,333225	0,251463	-0,129589	4,572976	-20 to 1200
18	2,2-Diméthylpropane	27,380416	0,018305	3,063221	-0,375030	-0,530964	2,059134	3,388342	-75 to 1200
19	n-Hexane	-17,191071	0,959226	-0,614725	6,142101	-6,160952	20,868190	-0,207040	-75 to 700
20	2-Méthylpentane	33,798408	0,173685	2,348998	0,844100	-1,559115	5,534684	2,968423	-75 to 700
21	3-Méthylpentane	17,964768	0,397799	1,209870	3,254556	-3,942661	14,384148	2,149541	-75 to 700
22	2,2-Diméthylbutane	92,706801	-0,500323	4,525783	-2,415290	0,713199	-0,591097	5,617113	-20 to 700
23	n-Heptane	-0,153725	0,754499	0,261728	4,366358	-4,484510	14,842099	0,380048	-75 to 700
24	2-Méthylhexane	17,893709	0,404849	1,334653	2,877698	-3,511818	12,540055	1,823456	-75 to 700
25	3-Méthylhexane	36,807299	0,167431	2,262250	1,067097	-1,781538	6,169491	2,864993	-75 to 700
26	2,4-Diméthylpentane	11,508769	0,093303	2,598254	0,630349	1,428307	4,569218	2,847131	-20 to 700
27	n-Octane	2,604725	0,724670	0,367845	4,142833	-4,240199	13,734055	0,327588	-75 to 700
28	2,2-Diméthylhexane	21,451302	0,226073	2,074483	1,466277	-2,169048	7,742088	2,139163	-20 to 700
29	2-Méthylheptane	27,405630	0,305110	1,826883	1,744174	-2,311344	7,752627	2,038844	-75 to 700
30	2,2,4-Triméthylpentane	26,118096	0,039675	2,742294	0,328610	-1,206014	4,586420	2,846608	-75 to 700
31	n-Nonane	4,000278	0,707805	0,438048	3,969342	-4,043158	12,876028	0,257265	-75 to 700
32	n-Décane	-6,962020	0,851375	-0,263041	5,521816	-5,631733	18,885443	-0,412446	-75 to 700
33	n-Undécane	65,290564	-0,099827	3,472495	-1,354336	0,264721	-0,145574	3,407959	-20 to 1200
34	m-Dodécane	60,967391	-0,077548	3,420649	-1,308559	0,247576	-0,130380	3,227042	-20 to 1200
35	n-Tridécane	62,748642	-0,096018	3,463033	-1,353243	0,264564	-0,145439	3,245905	-20 to 1200
36	n-Tétradécane	61,655096	-0,092312	3,452192	-1,345181	0,261574	-0,143007	3,172971	-20 to 1200
37	n-Pentadécane	62,217244	-0,100961	3,472075	-1,366935	0,269684	-0,150082	3,163060	-20 to 1200
38	n-Hexadécane	60,927011	-0,095563	3,459313	-1,356807	0,265935	-0,146753	3,095128	-20 to 1200
39	n-Heptadécane	60,853132	-0,098655	3,465969	-1,365537	0,269340	-0,149768	3,071276	-20 to 1200
40	n-Octadécane	60,419501	-0,098876	3,466295	-1,367430	0,270024	-0,150334	3,038272	-20 to 1200
41	n-Nonadécane	59,195816	-0,092752	3,451465	-1,354690	0,265281	-0,146249	2,979932	-20 to 1200
42	n-Eicosane	59,163624	-0,095147	3,456592	-1,360776	0,267410	-0,147933	2,963523	-20 to 1200

H = 0 kJ/kg pour le gaz parfait à 0 K.

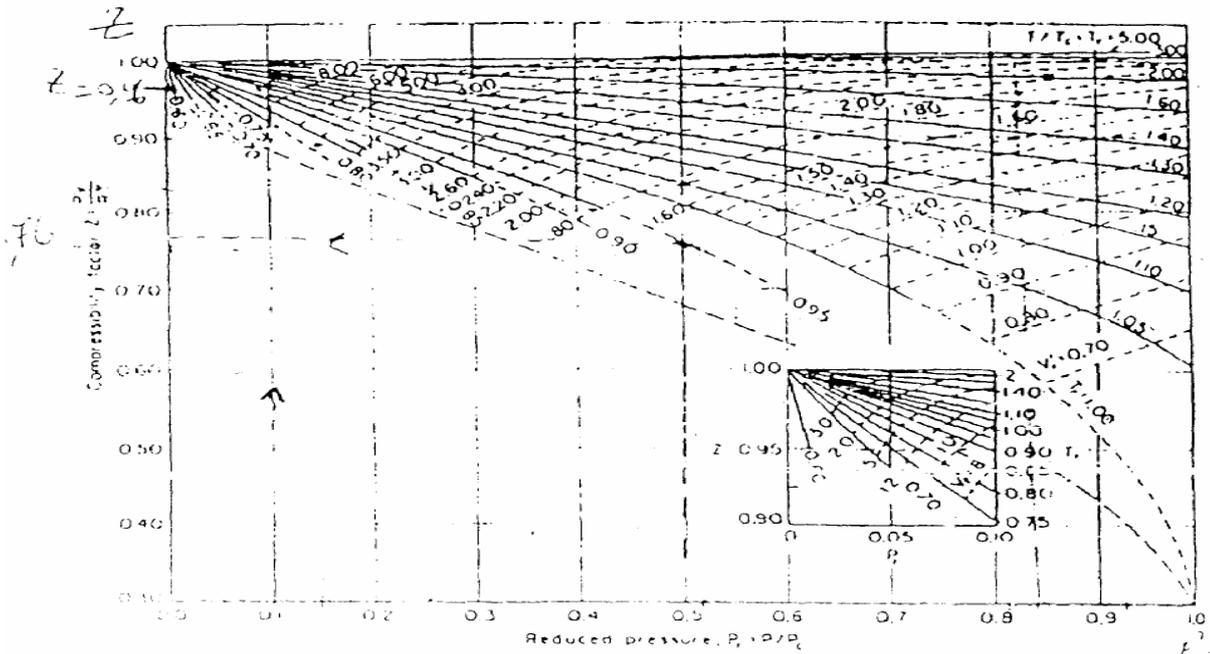
S = 1 kJ/kg K pour le gaz parfait à 0 K et 1 kPa

Les unités sont le kJ/kg pour l'enthalpie, le kJ/kg K pour le pouvoir calorifique et l'entropie.

Annexe 6 : La viscosité μ_g du gaz à la pression et température d'intérêt.



Annexe 7



12a - Generalized compressibility charts

$$\frac{v}{v_c} = \frac{ZT_c}{P_r T_r}$$

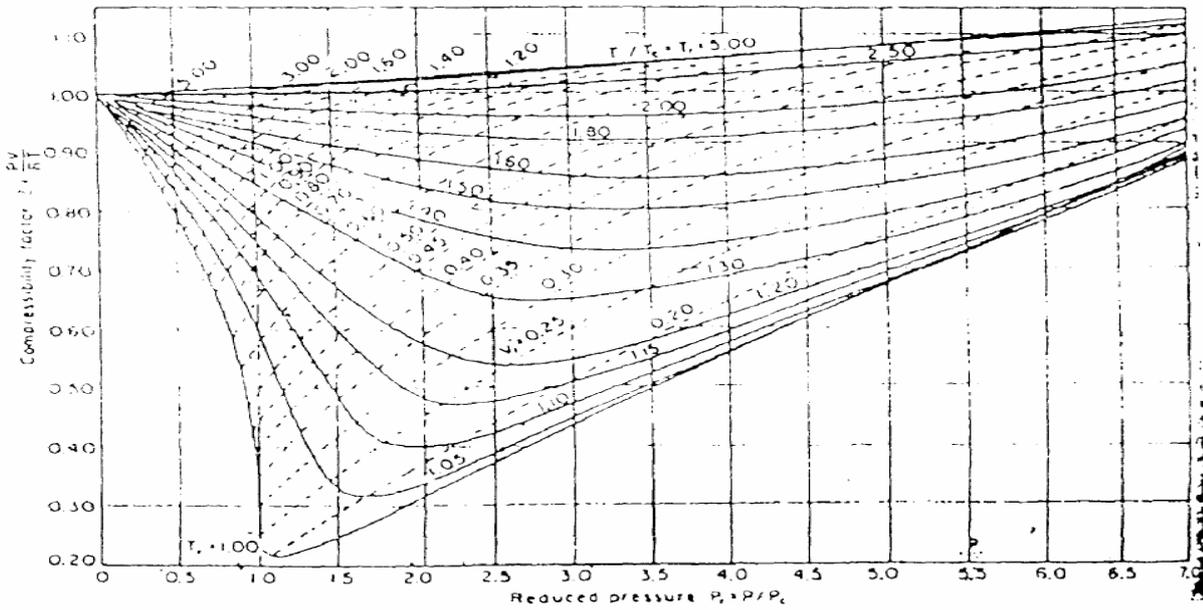


Figure VII- Détermination du coefficient de compressibilité Z.

Annexe 8 : Constantes critiques de pression et de température

NOTE: Numbers in this table do not have accuracies greater than 1 part in 1000; in some cases extra digits have been added to calculated values to achieve internal consistency or to permit recalculation of experimental values.

PHYSICAL CONSTANTS

*See the Table of Notes and References.

Number	See Note No. → Compound	Formula	A. B. C. D.					Critical constants			Number
			Molar mass (molecular weight)	Boiling point, °F 14.696 psia	Vapor pressure, psia 100 °F	Freezing point, °F 14.696 psia	Refractive index, n_D 60 °F	Pressure, psia	Temperature, °F	Volume, ft ³ /lb	
1	Methane	CH ₄	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41*	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1
2	Ethane	C ₂ H ₆	30.070	-127.46	(800)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2
3	Propane	C ₃ H ₈	44.097	-43.73	188.68	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3
4	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4
5	n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5
6	Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6
7	n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	488.1	385.7	0.0695	7
8	Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8
9	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9
10	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.177	121.50	9.859	-147.68	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13
14	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14
15	2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	194.05	2.273	-180.87	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16
17	3-Ethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18
19	2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19
20	3,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20
21	Triptane	C ₇ H ₁₆	100.204	177.54	3.376	-12.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21
22	n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22
23	Diisobutyl	C ₈ H ₁₈	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38735	361.1	530.26	0.0676	23
24	Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24
25	n-Nonane	C ₉ H ₂₀	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25
26	n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26
27	Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27
28	Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28
29	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.161	177.40	3.267	43.79	1.42053	590.7	536.6	0.0586	29
30	Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	98.188	213.69	1.609	-195.87	1.41778	503.4	570.20	0.0600	30
31	Ethene(Ethylene)	C ₂ H ₄	28.054	-154.71	(1400)*	-272.48*	(1.228)*	731.0	48.54	0.0746	31
32	Propene(Propylene)	C ₃ H ₆	42.081	-53.83	232.8	-301.45*	1.3006*	676.6	198.31	0.0717	32
33	1-Butene(Butylene)	C ₄ H ₈	56.108	20.79	62.55	-301.63*	1.3386*	586.4	296.18	0.0683	33
34	cis-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	38.69	49.97	-218.01	1.3556*	615.4	324.31	0.0667	34
35	trans-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	33.58	49.88	-157.97	1.3487*	574.9	311.80	0.0679	35
36	Isobutene	C ₄ H ₈	56.108	19.57	64.95	-220.60	1.3473*	580.2	292.49	0.0681	36
37	1-Pentene	C ₅ H ₁₀	70.134	85.92	19.12	-265.37	1.36487	509.5	376.86	0.0674	37
38	1,2-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	51.52	36.53	-213.14	—	(656.)*	(354.)*	(0.070)*	38
39	1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	24.06	59.46	-164.00	1.3975*	620.3	306.	0.0653	39
40	Isoprene	C ₅ H ₈	68.119	93.29	16.68	-230.71	1.41472	(582.)*	(403.)*	(0.066)*	40
41	Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	-119.21*	—	-113.4*	—	890.4	95.29	0.0693	41
42	Benzene	C ₆ H ₆	78.114	176.13	3.225	41.96	1.49436	710.4	552.15	0.0531	42
43	Toluene	C ₇ H ₈	92.141	231.08	1.033	-138.96	1.49102	595.5	605.50	0.0549	43
44	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.167	277.10	0.3716	-138.933	1.49022	523.0	651.22	0.0564	44
45	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	291.91	0.2643	-13.32	1.50017	541.6	674.85	0.0557	45
46	m-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	282.35	0.3265	-54.16	1.49177	512.9	650.95	0.0567	46
47	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	280.98	0.3424	55.87	1.49039	509.2	649.47	0.0572	47
48	Styrene	C ₈ H ₈	104.152	293.40	0.2582	-23.14	1.54937	587.8	(703.)*	0.0534	48
49	Isopropylbenzene	C ₉ H ₁₂	120.194	306.27	(0.188)	-140.838	1.48607	465.4	676.2	0.0569	49
50	Methyl alcohol	CH ₃ O	32.042	148.41	4.631	-143.77	1.32443	1174.	463.01	0.0590	50
51	Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ O	46.069	172.87	2.313	-173.4	1.35717	891.7	465.31	0.0581	51
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-312.61	—	-336.99*	1.00028*	506.8	-220.51	0.0527	52
53	Carbon dioxide	CO ₂	44.010	-109.235*	—	-69.81*	1.00038*	1069.5	87.73	0.0342	53
54	Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1300.	212.40	0.0461	54
55	Sulfur dioxide	SO ₂	64.065	14.11	85.46	-103.84*	1.00059*	1143.	315.7	0.0305	55
56	Ammonia	NH ₃	17.0305	-27.98	211.9	-107.85*	1.00033*	1647.	270.2	0.0681	56
57	Air	N ₂ +O ₂	28.9625	-317.81	—	—	1.00028*	546.9	-221.30	0.0517	57
58	Hydrogen	H ₂	2.0159	-423.130*	—	-434.824*	1.00013*	187.5*	-400.3*	0.5101*	58
59	Oxygen	O ₂	31.9988	-297.317*	—	-361.826*	1.00027*	731.4	-181.41	0.0367	59
60	Nitrogen	N ₂	28.0134	-320.436	—	-345.995*	1.00028*	492.8	-232.49	0.0510	60
61	Chlorine	Cl ₂	70.9054	-29.12	157.3	-149.70*	1.3735*	1157.	290.69	0.0280	61
62	Water	H ₂ O	18.0153	211.953*	0.95014	32.018	1.33335	3200.1	705.11	0.04975	62
63	Helium	He	4.0026	-452.110	—	—	1.00003*	32.99	-450.31	0.2300	63
64	Hydrogen chloride	HCl	36.4606	-121.25	906.71	-173.50*	1.00039*	1205.	124.75	0.0356	64